



**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Агробіологічний факультет

Кафедра ґрунтознавства та охорони ґрунтів

ім. проф. М.К. Шикuli

МЕЛІОРАЦІЯ ҐРУНТІВ

КУРС ЛЕКЦІЙ

для здобувачів ОС «Магістр»

ОП «Охорона та технології відновлення ґрунтів»

Спеціальність Н1 «Агрономія»



Київ - 2025

УДК 631.6: 631.415.26

Меліорація ґрунтів : курс лекцій для здобувачів вищої освіти ОС «Магістр», ОП «Охорона та технології відновлення ґрунтів» зі спеціальності Н1 «Агрономія». Київ : НУБіП України, 2025. 155 с.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри ґрунтознавства та охорони ґрунтів ім. проф. М.К. Шикучи протокол №3 від 28 жовтня 2025р.

Рекомендовано до видання Вченою радою агробіологічного факультету Національного університету біоресурсів і природокористування України, протокол № 10 від 25 листопада 2025 р.

Укладачі: канд. с.-г. наук, доц. **А.В. Ярош**

Рецензенти: д. с.-г. наук., проф. **А.Д. Балаєв**
канд. с.-г. наук, доц. **І.Л. Гаврись**

Навчальне видання
МЕЛІОРАЦІЯ ҐРУНТІВ
КУРС ЛЕКЦІЙ

для здобувачів освітнього ступеня «Магістр»
ОП «Охорона та технології відновлення ґрунтів»
зі спеціальності Н1 «Агрономія»

Підписано до друку

Формат 60х84 1/16

Ум. друк. арк. 3,7

Обл. вид. арк.

Тираж 20 пр.

© Ярош А.В.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА

МОДУЛЬ 1. МЕЛІОРАЦІЯ ЯК СКЛАДОВА СТАЛОГО УПРАВЛІННЯ ҐРУНТОВИМИ РЕСУРСАМИ

Лекція 1. Вступ до дисципліни «Меліорація ґрунтів»

- 1.1.** Поняття, мета та завдання меліорації ґрунтів
- 1.2.** Меліорація у системі сталого управління ґрунтовими ресурсами
- 1.4.** Меліоративні заходи та їх роль у запобіганні деградації ґрунтів
- 1.5.** Сучасні тенденції розвитку меліорації: від управління властивостями ґрунту до управління його функціями

Лекція 2. Гідротехнічні меліорації: сучасні тенденції та реформування сфери зрошення

- 3.1.** Поняття, завдання та роль гідротехнічних меліорацій
- 3.2.** Зрошення як інструмент управління водним режимом ґрунтів
- 3.3.** Світові тенденції розвитку зрошення та ефективного водокористування
- 3.4.** Сучасний стан і основні виклики зрошення в Україні
- 3.5.** Реформування системи управління зрошенням в Україні
- 3.6.** Законодавча та нормативно-правова база у сфері зрошення
- 3.7.** Успішні практики реформування та розвитку зрошення: світовий і вітчизняний досвід

Лекція 4. Гідротехнічні меліорації: дренаж та управління надлишком води

2Лекція 5. Агротехнічні меліорації ґрунтів

- 5.1.** Сутність та основні напрями агротехнічної меліорації
- 5.2.** Регенеративне землеробство як сучасна концепція управління станом ґрунтів
- 5.3.** Сучасні системи обробітку ґрунту та їх меліоративне значення
- 5.4.** Сівозміни, покривні культури та сидерація у відновленні ґрунтових

властивостей

5.5. Фітомеліорація та біологізація землеробства

5.6. Агротехнічні меліорації у відновленні деградованих ґрунтів

Лекція 6. Меліоративні заходи з охорони ґрунтів від водної ерозії та дефляції

6.1. Водна ерозія та дефляція як процеси деградації ґрунтів

6.3. Протиерозійна організація території та агротехнічні заходи

6.4. Лісомеліоративні та фітомеліоративні заходи захисту ґрунтів

6.5. Сучасні технології управління ерозійними ризиками

6.6. Ерозійні ризики в умовах воєнних дій та заходи щодо їх мінімізації

Лекція 7. Хімічні меліорації ґрунтів

7.1. Сутність, мета та завдання хімічної меліорації ґрунтів

7.2. Кислотність ґрунту та потреба у вапнуванні

7.3. Засолення, солонцюватість та потреба у хімічній меліорації

7.4. Меліоранти для вапнування: властивості, вибір та застосування

7.5. Гіпсування та інші способи хімічної меліорації

7.6. Відношення сільськогосподарських культур до реакції ґрунтового середовища

7.7. Оцінювання ефективності хімічної меліорації

Лекція 10. Smart-технології та штучний інтелект у меліорації

10.1. Цифровізація меліорації: концепція та основні напрями

10.2. Smart-технології у підвищенні ефективності управління ґрунтовими та водними ресурсами

10.3. Сенсорні технології для моніторингу стану ґрунтів

10.4. Дистанційне зондування та геоінформаційні технології у меліорації

10.5. Штучний інтелект і аналіз даних для підтримки меліоративних рішень

10.6. Перспективи цифрової меліорації в Україні

МОДУЛЬ 2. СИСТЕМА МЕЛІОРАТИВНИХ ЗАХОДІВ У ПРОЦЕСІ ВІДНОВЛЕННЯ ҐРУНТІВ, ПОРУШЕНИХ УНАСЛІДОК ВОЄННИХ ДІЙ

Лекція 11. Військові дії як чинник деградації та порушення ґрунтів

- 11.1.** Військові дії як новий фактор антропогенного впливу на ґрунтовий покрив
- 11.2.** Основні типи порушень і деградації ґрунтів унаслідок воєнних дій
- 11.3.** Фізичне порушення, ущільнення та деградація структури ґрунтів
- 11.4.** Хімічне забруднення та зміна ґрунтово-екологічних властивостей
- 11.5.** Порушення водного режиму та гідрологічних умов територій
- 11.6.** Оцінювання масштабу та рівня порушення ґрунтів

Лекція 13. Гідромеліоративна інфраструктура Півдня України: історія, значення, наслідки руйнування та стратегії відновлення

- 13.1.** Формування та розвиток зрошувальної інфраструктури Півдня України
- 13.2.** Значення зрошення для аграрного виробництва та стану ґрунтів регіону
- 13.3.** Наслідки пошкодження та руйнування гідромеліоративної інфраструктури
- 13.4.** Екологічні та соціально-економічні наслідки порушення водозабезпечення
- 13.5.** Принципи відновлення та модернізації гідромеліоративної інфраструктури
- 13.6.** Перспективи розвитку зрошення Півдня України в умовах кліматичних змін

Лекція 14. Меліорація сільськогосподарських угідь, пошкоджених під час воєнних дій

- 14.1.** Діагностика стану та визначення придатності земель до використання
- 14.2.** Відновлення фізичних властивостей і структури ґрунтів
- 14.3.** Управління водним режимом порушених ґрунтів
- 14.4.** Хімічна меліорація та відновлення агрохімічних властивостей
- 14.5.** Фітомеліорація та біологічне відновлення ґрунтів
- 14.6.** Комплексні технології відновлення сільськогосподарських угідь
- 14.7.** Моніторинг ефективності відновлювальних заходів

Лекція 15. Світовий досвід відновлення ґрунтів і земель після воєн та інших масштабних порушень

15.1. Особливості відновлення ґрунтів на територіях, що постраждали від воєнних дій

15.2. Практики відновлення земель у країнах світу

15.3. Технологічні та організаційні підходи до ремедіації та меліорації порушених земель

15.4. Участь держави, громад та аграрного бізнесу у відновленні земель

15.5. Можливості адаптації світового досвіду до умов України

15.6. Меліорація ґрунтів у контексті післявоєнного відновлення та європейської інтеграції України

ЗАКЛЮЧЕННЯ

РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

ДОДАТКИ

ПЕРЕДМОВА

Меліорація ґрунтів - це одна з найважливіших складових охорони та раціонального використання земельних ресурсів. Її мета полягає у створенні сприятливих водно-повітряних, теплових і поживних умов для рослин, відновленні родючості деградованих земель і забезпеченні стабільного функціонування агроєкосистем. У сучасних умовах зміни клімату, дефіциту водних ресурсів і зростання антропогенного навантаження роль меліорації набуває нового змісту — вона стає ключовим інструментом сталого землекористування та адаптації сільського господарства до викликів сьогодення.

Курс лекцій допомагає опанувати системне розуміння теоретичних і прикладних аспектів меліорації. У ньому розглядаються основні види меліорацій - гідротехнічна, агролісомеліорація, хімічна, агротехнічна, культуртехнічна - а також можливостям меліоративних заходів у процесі відновлення ґрунтів пошкоджених воєнними діями. Значна увага приділяється питанням регулювання водного режиму ґрунтів, запобігання ерозії, осолонцюванню та заболочуванню, а також оцінці екологічних і економічних наслідків меліоративних заходів.

Сучасний етап розвитку меліорації характеризується активним упровадженням цифрових технологій, що забезпечують точність і ефективність управління водними ресурсами. У курсі розглядаються можливості використання Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (ШІ), Smart-технологій та геоінформаційних систем (ГІС) для моніторингу стану ґрунтів, автоматизованого керування зрошенням і прогнозування потреб у волозі. Такі рішення сприяють переходу до інтегрованого, науково обґрунтованого підходу до управління агроландшафтами.

Значну увагу присвячено відновленню та рекультивації ґрунтів, пошкоджених унаслідок воєнних дій і техногенних впливів. Розглядаються методи усунення

забруднення, поліпшення фізичних властивостей і відновлення біологічної активності ґрунтів.

Засвоєння матеріалу курсу покликане сформувати у студентів комплексне бачення меліорації як міждисциплінарної галузі, що поєднує інженерні, агрономічні та екологічні знання. Це дозволить майбутнім фахівцям грамотно планувати та реалізовувати меліоративні заходи, спрямовані на підвищення ефективності сільськогосподарського виробництва і збереження природних ресурсів. Теоретична база курсу «Меліорація ґрунтів» є основою для подальшої практичної діяльності й наукових досліджень у сфері відновлення та раціонального використання ґрунтів.

МОДУЛЬ 1. Меліорація як складова сталого управління ґрунтовими ресурсами

ЛЕКЦІЯ 1. Меліорація як складова сталого управління ґрунтовими ресурсами

Меліорація - це комплекс гідротехнічних, культуртехнічних, хімічних, агротехнічних та агролісотехнічних заходів, спрямованих на регулювання водного, теплового, повітряного й поживного режимів ґрунтів, збереження та підвищення їхньої родючості. Вона принципово відрізняється від звичайних агротехнічних операцій (таких як оранка чи боронування), оскільки має тривалий і глибокий вплив на властивості ґрунту.

Меліорація є невід'ємним елементом сталого управління ґрунтовими ресурсами, оскільки забезпечує їхнє раціональне використання, відновлення родючості та підвищення продуктивності. Її метою є усунення або зменшення впливу несприятливих природних і антропогенних чинників через комплекс дій, спрямованих на покращення фізичних, хімічних і біологічних властивостей ґрунту.

1.1. Меліорація у системі сталого управління ґрунтовими ресурсами

Збереження та відновлення родючості ґрунтів. Меліоративні заходи сприяють боротьбі з ерозійними процесами, деградацією ґрунтів та виснаженням їхнього потенціалу. Зокрема, дренажні системи, протиерозійні споруди та заходи з регулювання водного режиму допомагають підтримувати оптимальні умови для росту рослин.

Поліпшення фізичних властивостей ґрунтів. Завдяки меліорації поліпшуються структура, аерація, водно-повітряний і тепловий режими ґрунту. Такі зміни забезпечують ефективніше використання вологи та поживних речовин, зменшують ризик заболочування чи засолення.

Зменшення негативного впливу на довкілля. Оптимізація ґрунтових умов знижує потребу у надмірному використанні мінеральних добрив і пестицидів, що, у свою чергу, зменшує ризики забруднення ґрунтових і поверхневих вод. Важливу роль у цьому відіграють буферні зони, фільтраційні насадження та ефективне управління водними ресурсами.

Підвищення продуктивності та економічної ефективності сільгоспугідь. Завдяки меліорації підвищується врожайність сільськогосподарських культур і розширюються площі, придатні для землеробства. Осушення перезволожених територій і зрошення посушливих земель створюють передумови для стабільного виробництва продукції навіть у несприятливих кліматичних умовах.

Під впливом тривалої експлуатації у ґрунті відбуваються суттєві зміни, що потребують постійного моніторингу та коригування. Найбільш відчутно трансформуються водний, повітряний, тепловий і сольовий режими, а також умови живлення рослин. Саме тому меліораційні заходи залишаються необхідним інструментом підтримання екологічної рівноваги та сталого розвитку агроландшафтів.

1.2.Інструменти управління якістю ґрунтів

Меліорація формує широкий спектр інструментів, спрямованих на докорінне поліпшення властивостей ґрунтів і забезпечення їхнього раціонального використання. Ці інструменти охоплюють різні напрями — від гідротехнічного регулювання водного режиму до хімічного поліпшення складу ґрунту та протидії деградаційним процесам.

Водне регулювання (гідротехнічна меліорація) передбачає регулювання водно-повітряного режиму ґрунтів з метою підвищення їхньої родючості. Найпоширенішими заходами є зрошення і дренаж. Сучасні системи зрошення,

зокрема краплинне зрошення, забезпечують локальне і точне подавання води безпосередньо в зону розташування коренів. Це дає змогу скоротити втрати вологи, зменшити забур'яненість міжрядь і обмежити розвиток грибкових хвороб завдяки сухій поверхні ґрунту. Не менш важливою складовою є дренажні системи, які відводять надлишкову вологу, запобігаючи перезволоженню та заболоченню. Дренаж і промивання виступають основними заходами боротьби із засоленням і вторинним осолонцюванням зрошуваних ґрунтів, особливо в умовах південних регіонів України.

Хімічна меліорація охоплює заходи, спрямовані на поліпшення фізико-хімічних властивостей ґрунтів. У південних регіонах, де інтенсивне зрошення часто зумовлює вторинне засолення та осолонцювання, застосовується гіпсування. Гіпс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) заміщає катіони натрію на кальцій у ґрунтово-поглинаючому комплексі, що сприяє руйнуванню щільного солонцевого горизонту, покращенню структури та водопроникності. Найвищої ефективності гіпсування досягає за умови поєднання з внесенням органічних добрив і зрошенням. Для кислих ґрунтів, поширених у зоні Полісся та Лісостепу, застосовується вапнування, яке знижує кислотність, поліпшує агрофізичні властивості ґрунту та підвищує доступність елементів живлення для рослин.

Протидія деградації: боротьба з ерозією та дефляцією. Ґрунти, особливо в степових ландшафтах України, схильні до ерозії (руйнування водними потоками) та дефляції (руйнування вітром). Меліоративний комплекс заходів включає: лісомеліорацію - створення полезахисних смуг, які зменшують швидкість вітру, знижують випаровування вологи й підвищують протиерозійну стійкість угідь; гідротехнічні споруди (вали, водозбірні канами, водовідвідні лотки), що зменшують поверхневий стік і попереджують змивання ґрунту; терасування схилів (зазвичай при крутизні $0,5-8^\circ$), яке не лише запобігає ерозії, а й підвищує зволоження орного

шару; агротехнічні заходи - глибоке рихлення, щільювання, плантажна оранка, які сприяють руйнуванню ущільнених горизонтів і відновленню водопроникності.

Сучасні меліоративні технології — це не просто спосіб обробки, а наука, що вивчає закономірності перетворення об'єкта. Вони вимагають застосування системного аналізу, що є сукупністю наукових методів для вирішення складних проблем в умовах невизначеності, що дозволяє розглядати проблему, не як окремий виклик підсистеми (наприклад, деградацію ґрунтів), а як єдиний організм.

Наразі, меліорація є стратегічним інструментом довготривалого поліпшення якості земельних і водних ресурсів, поєднуючи інженерні, біологічні, хімічні та інформаційні методи в єдину систему сталого управління. У сучасних умовах цифрової трансформації ключову роль у розвитку меліоративних систем відіграють смарт-технології, засновані на використанні Інтернету речей (ІоТ), штучного інтелекту (ШІ) та геоінформаційних платформ (ГІС). Мережі сенсорів, інтегровані в системи зрошення, забезпечують безперервний моніторинг вологості, температури, електропровідності та солоності ґрунту, дозволяючи в режимі реального часу регулювати подачу води та добрив. Алгоритми штучного інтелекту аналізують великі обсяги даних, прогнозують зміни стану ґрунту і водних ресурсів, оптимізують витрати води та енергії. Використання Smart Irrigation Systems сприяє скороченню водоспоживання на 20–40%, зниженню навантаження на екосистеми та забезпеченню стабільної продуктивності агроландшафтів навіть за умов кліматичних коливань. Таким чином, поєднання класичних меліоративних підходів із цифровими технологіями формує нову парадигму інтелектуального управління ґрунтово-водними ресурсами, що відповідає принципам сталого розвитку та адаптивного землекористування.

Меліоративний інструментарій в управлінні якістю ґрунтів дозволяє оцінювати стан ґрунтів за допомогою моніторингу земель, приймати управлінські рішення, необхідні для підтримки адаптивного меліоративного режиму ґрунтів,

прогнозувати можливі результати функціонування системи за допомогою математичних моделей, забезпечувати стале управління ґрунтовими ресурсами

Лекція 2. Основи меліоративного ґрунтознавства

2.1. Зміст дисципліни

Меліоративне ґрунтознавство є ключовим розділом ґрунтознавства, основна мета якого — вивчення ґрунтового покриву як цільового об'єкта меліорації.

Дисципліна тісно інтегрована з природничими та біологічними науками, забезпечуючи підґрунтя для раціонального та сталого землекористування. Об'єктами меліоративних заходів є ґрунти, що мають несприятливі природні або природно-антропогенні властивості. До них належать ґрунти з низькою природною родючістю, надмірно виснажені, заболочені, надмірно зволожені, а також еродовані та ерозійно небезпечні.

Ключовим завданням меліоративного ґрунтознавства є не лише корекція поточних несприятливих властивостей, але й забезпечення наукового прогнозування. Це включає прогнозування змін ґрунтів, які відбуваються під впливом як окремих, так і комплексних меліорацій, а також внаслідок впровадження ґрунтозахисного землеробства.

Такий системний підхід визначає сучасну спрямованість дисципліни. Сучасні пріоритети ґрунтознавчих досліджень демонструють стратегічний зсув від простого виправлення деградації до **забезпечення стійкості** (резилієнтності) ґрунтових екосистем. Аналіз ґрунтознавчих досягнень визначив, що важливими напрямками є ґрунтово-меліоративні інновації та розробка екологічно безпечних систем управління родючістю.

Якщо історично меліорація фокусувалася на інженерних заходах (дренаж, іригація) для виправлення локальних проблем, то сьогодні акцент зміщується на системне управління в умовах кліматичних змін і ринкової економіки. Така зміна фокусу вимагає інтеграції меліоративного ґрунтознавства з екологічною політикою та економічною оцінкою. Наприклад, в Україні, де значні площі чорноземів схильні

до деградації, стає виробництво рослинницької продукції вимагає впровадження **синергетичних меліоративних комплексів** — поєднання іригації, дренажу, протиерозійних та водорегулювальних заходів. Тільки комплексний підхід може підняти природно-територіальний комплекс (ПТК) на рівень збалансованого розвитку.

2.2. Діагностика деградації ґрунтів та меліоративне районування

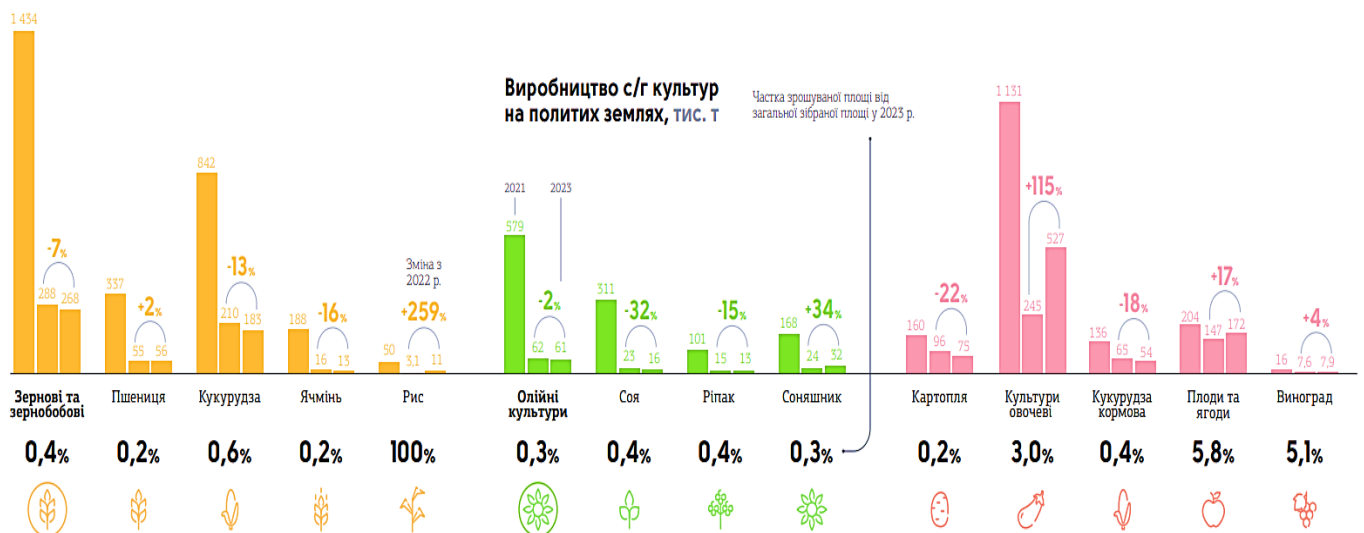
Діагностика деградації ґрунтів вимагає чіткої класифікації несприятливих властивостей, включаючи водну та вітрову ерозію (дефляцію), засолення, солонцюватість, підкислення та перезволоження. Особливу увагу в останні роки приділяють **проблемі нейтральної деградації**. Цей концепт стосується змін у властивостях ґрунтів, які не завжди мають явні зовнішні ознаки (наприклад, хімічний дисбаланс, зниження мікробного різноманіття), але критично знижують їхні продуктивні, екологічні та соціальні функції. Меліоративне районування є фундаментальною методологічною основою для планування. Воно забезпечує раціональне галузеве та регіональне меліоративно-ґрунтознавче землекористування, а також є основою для охорони та відтворення родючості ґрунтів. Актуальним пріоритетом ґрунтознавства є дослідження **вуглецевого балансу ґрунтів**. Збільшення вмісту органічного вуглецю в ґрунті розглядається не лише як засіб підвищення родючості, а й як стратегічний механізм пом'якшення кліматичних змін. Таким чином, меліоративні заходи, такі як мінімізований обробіток чи внесення органічних меліорантів, набувають кліматичної значимості, інтегруючи сільське господарство у світові схеми вуглецевого фермерства. Визначення пріоритетних напрямів досліджень, таких як вуглецевий баланс, дозволяє фахівцям адаптувати меліоративне районування під нові виклики, зокрема, моделювати вплив кліматичних змін (збільшення посушливості) на зони ризику деградації, вимагаючи впровадження більш стійких меліоративних технологій.

2.3.

ЛЕКЦІЯ 3. Гідротехнічні меліорації: реформування в сфері зрошення

3.1. Поняття і значення гідротехнічних меліорацій

Гідротехнічні меліорації – сукупність інженерно-гідротехнічних заходів (зрошувальних та осушувальних систем), спрямованих на регулювання водного режиму ґрунтів. Такі меліорації дозволяють стабілізувати вологість ґрунту: подолати посуху в степових регіонах і надмірну зволоженість у Поліссі. За рахунок зрошення отримують значно вищі врожаї: наприклад, за оцінками початку 2000-х, 14% меліорованих земель давали 20% валового виробництва рослинницької продукції (100% рису, 60% овочів тощо). Сучасні дослідження підтверджують, що розширення площ під зрошенням – ключовий чинник продовольчої безпеки (особливо у посушливих умовах).



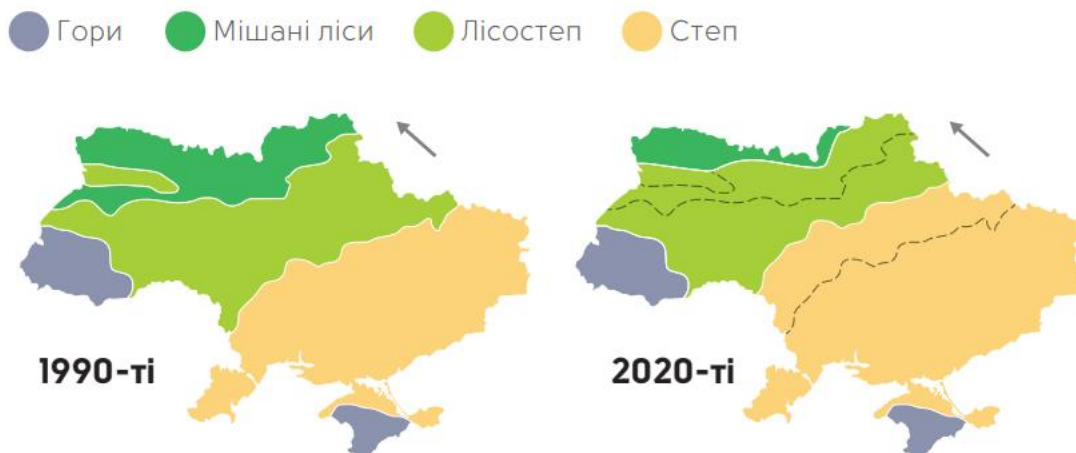
Джерела: Держстат, Держрибагентство

Водночас виклики кліматичних змін вимагають перехід до ресурсощадних технологій поливу (мікродощування, у т.ч. краплинного, імпульсного) і вдосконалення управління водними ресурсами.

3.2. Світові тенденції розвитку зрошення та ефективного водокористування

У багатьох країнах створено системи іригації, що відіграють вирішальну роль у сільському господарстві. Досвід Китаю, США, Єгипту, Ізраїлю, Німеччини, В'єтнаму, Австралії та інших країн виявляє важливість модернізації інфраструктури та управління водою. Так, Ізраїль використовує очищені стічні води та опріснення для зрошення, а сучасні системи краплинного поливу забезпечують високу продуктивність води. У США зростає попит на ефективне зрошення на заході країни під дією багаторічної посухи. Водночас досвід Китаю демонструє нові проблеми: відсутність координації фінансування між центральними та місцевими рівнями, низьку мотивацію фермерів інвестувати у зрошення, конфлікти через приватизацію землі та старіння інфраструктури.

Зміщення природних зон



На основі цих міжнародного досвіду виокремлюють такі напрями вирішення проблеми:

- укріплення фінансової відповідальності влади на всіх рівнях,
- збільшення субсидій на реконструкцію,
- створення локальних об'єднань водокористувачів для спільного управління інфраструктурою.

Загальні тенденції у світі такі: підвищення енергоефективності і автоматизації поливу, перехід до прозорого обліку води й тарифікації, впровадження прав користування водою (ліцензій, пайової ділянки) та створення Асоціацій водокористувачів.

3.3. Сучасний стан і основні виклики зрошення в Україні

До повномасштабної війни в Україні поливалося близько 600 тис. га сільгоспугідь.



У 2023 тенденція скорочення площ під зрошенням продовжилась. До факторів окупації та ведення бойових дій у Херсонській і Запорізькій областях додався підрив Каховської ГЕС, адже саме Каховське водосховище було основним джерелом прісної води для систем меліорації на півдні України. На цьому тлі площі зрошуваних земель скоротилися на 78% порівняно з 2021 роком. Найбільше зниження спостерігалось під зерновими та олійними культурами на 81 та 89% відповідно. Скорочення зрошуваних площ під овочами та фруктовими садами було менш істотним.

Після руйнування Каховської ГЕС (у 2023 р.) площа зрошення скоротилася до ~100 тис. га. За оцінками Інституту водних проблем і меліорації НААН, 347 тис. га зрошуваних земель “пішли” разом з водосховищем, решту – втрачено через проблеми зруйнованих систем і відсутність інвестицій. Потенціал Каховського водосховища розраховувався на 1 млн га поливу, що могло забезпечити високу рентабельність (чистий прибуток до 30–35 тис. грн/га).

Нині акцент переноситься на розвиток дрібного зрошення (100–300 га) в Одеській, Миколаївській областях тощо: оцінили потенціал до ~300 тис. га за умов налагодження малих систем. Основні причини занепаду: старіння радянської меліоративної мережі, недостатнє фінансування, відсутність чіткої тарифної політики, нестача кваліфікованих кадрів.

3.4. Реформування системи управління зрошенням в Україні

У відповідь на виклики уряд затвердив низку стратегічних кроків. *Стратегія зрошення та дренажу до 2030 р.* (КМУ, 2019) спрямована на відновлення потенціалу систем та перехід до більш ефективного управління. Її ключовою метою є інтегроване басейнове управління водними ресурсами та реформа системи держуправління меліорацією. Зокрема, передбачається створення добровільних

об'єднань водокористувачів (ОВК) як самофінансових структур для обслуговування меліорації. Організації водокористувачів (ОВК). У 2023 році вперше об'єкти інженерної інфраструктури меліоративної мережі передано у власність організації водокористувачів - це неприбуткові організації створені власниками сільгоспземель для управління системами зрошення.

Виконання Стратегії включає.

Інституційні зміни: прийнято у 2022 р. Закон «Про організації водокористувачів та стимулювання гідротехнічної меліорації земель» (No.2079-IX), який надає фермерам право створювати ОВК і безоплатно отримувати внутрішні меліоративні мережі для спільного використання. Ця реформа передбачає передачу меліоративних активів (каналів, насосних станцій тощо) від держави чи громади безоплатно ОВК та аграріям.

Кількість ОВК

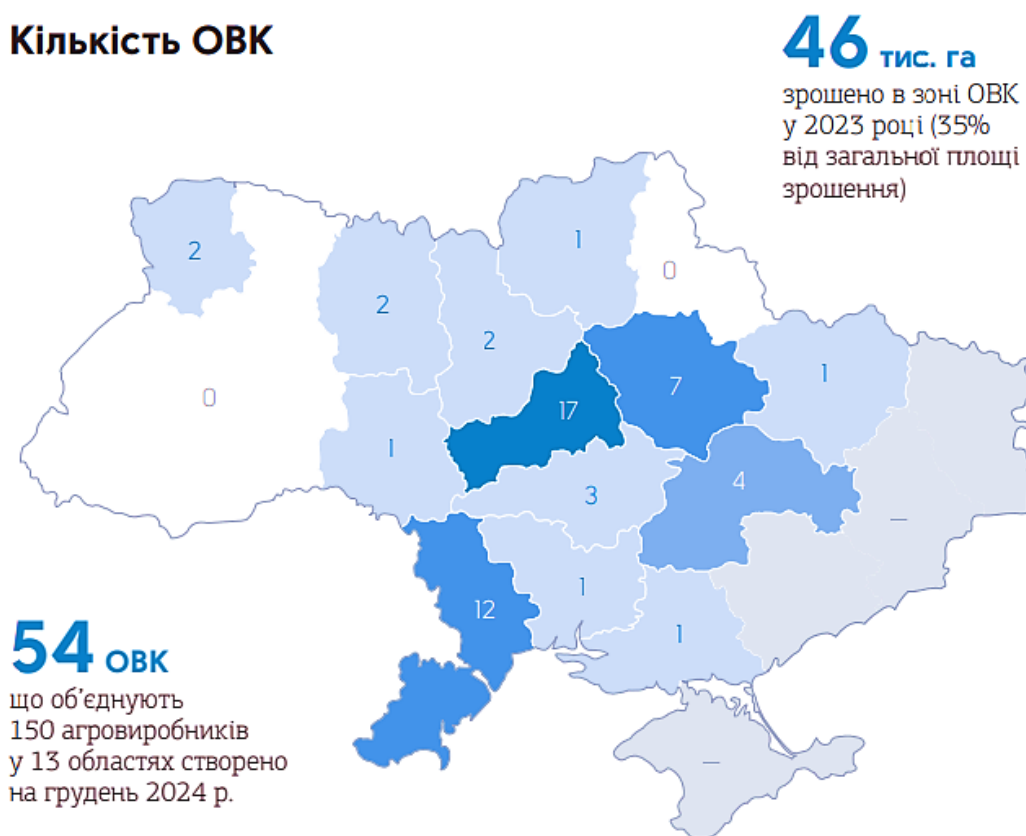


Рис. __ Кількісний розподіл створених ОВК у розрізі областей на грудень 2024р

Джерело

Фінансові інструменти: пропонується впровадження двокомпонентних тарифів: фіксованої плати за утримання мереж і змінної за обсяг водоспоживання. У 2024 р. уряд затвердив програму підтримки, що компенсує 50% витрат фермерів на будівництво та реконструкцію внутрішніх систем (насоси, труби, форсунки). Це стимулює приватні інвестиції і кредитування малого зрошення.

Організаційні зміни: створено Державне агентство меліорації (підпорядковане Мінекології/Мінагро) замість застарілого Госводагентства. Проте процес передачі активів новій агентурі затримується, що гальмує реформу.

Готується також законопроект №7577 «Про операторів водогосподарсько-меліоративних систем» – для створення державних неприбуткових підприємств-операторів міжгосподарських мереж зі змішаним управлінням (у складі ради – представники ОВК та незалежні експерти). Цей крок передбачає делегування функцій експлуатації основних каналів оператором, що зможе залучати інвестиції і брати кредити, з поступовим самофінансуванням.

Роль держави і фермерів: вважається, що утримання меліоративного комплексу можливо лише за партнерства держави й приватного сектора. Державна підтримка (через бюджети та донорів) залишається критичною на початкових етапах. Наприклад, USAID надавав гранти на модернізацію через ОВК, а Світовий банк працював над «Інвестиційною стратегією 2020–2030» розвитку зрошення. З іншого боку, фермери отримують право самостійно планувати пріоритети модернізації своїх систем і брати участь у фінансуванні.

За Стратегією 2030 також визначено **конкретні завдання** (за нормативно-правовими документами КМУ) – зокрема:

Завдання 1. Нарощування потенціалу зрошення/дренажу: налагодження виробництва насосів та поливальних машин, розробка й регулювання тарифів на водоподачу/водовідведення, удосконалення моніторингу земель і стану систем, розширення наукових досліджень та підготовка кадрів.

Завдання 2. Модернізація міжгосподарських мереж: заміна насосно-силового обладнання на головних станціях і спорудах, впровадження засобів обліку та автоматизації подачі й розподілу води.

Завдання 3. Модернізація внутрішньогосподарських систем: впровадження енергоощадних дощувальних машин (низьконапірних, краплинних тощо), ремонт/заміна трубопроводів і насосів на полях, що фінансуються фермерами.

Ці заходи мають виконуватися поетапно, з урахуванням технічного стану мереж та попиту аграріїв на полив.

3.5. Законодавча та нормативно-правова база у сфері зрошення

Основу нормативної системи складають закони та підзаконні акти, що регулюють меліорацію та водне господарство. Серед ключових документів:

Закон України «Про меліорацію земель» (2000) – базовий закон, що визначає правові засади меліоративної діяльності (вводить поняття меліорованих земель, вимагає соціальної регульованості тарифів на полив тощо).

Водний кодекс України (1995) – визначає загальні принципи управління водними ресурсами (включно зі зрошенням).

Стратегія зрошення та дренажу 2019–2030 (Кабінет Міністрів України) – створює рамки реформування сектору.

Закон «Про організації водокористувачів...» (2022) – регулює створення ОВК, порядок передачі їм меліоративних систем.

Постанови Кабінету Міністрів: наприклад, №766 (2020) «Про нормативи екологічно безпечного зрошення» встановлює граничні параметри якості води та ґрунту для зрошення. У цих нормативних показниках визначено, у яких умовах полив є безпечним або потребує спеціальних заходів.

Програми держпідтримки: у червні 2024 р. ухвалено постанову №628, яка встановлює компенсацію до 50% інвестицій у внутрішньогосподарські системи – це пряма фінансова підтримка відновлення зрошення.

Інші документи: земельне та податкове законодавство (щодо оренди і власності земель, пільг для ОВК), міські плани раціонального використання водних ресурсів тощо.

Враховано і міжнародні зобов'язання: наприклад, басейновий підхід управління водою передбачено законом 2016 року та директивами ЄС, а також принципами Ріо/Дублін (про участь користувачів).

3.6. Успішні практики реформування та розвитку зрошення: світовий і вітчизняний досвід

В Україні (до повномасштабного вторгнення): спільно з донорами розробляли та впроваджували «**Інвестиційну стратегію меліорацій**», проводили конкурси на концесії меліоративних систем, щоб залучити інвесторів. Приватні компанії (наприклад, «Variant Agro Bud») впроваджували власні рішення поливу: встановили понад 20 сучасних поливальних машин, що частково забезпечувало відновлення зрошення півдня.

У форматі **офіційних програм** у 2019–2020 рр. у Херсонській обл. проводилося відновлення кількох господарських мереж із вигодою для фермерів (зниження енерговитрат, зростання врожайності кукурудзи та овочів).

Практикувалося **мале зрошення**: за відсутності ресурсів на масштабні проєкти більша увага приділялася дрібним системам (100–300 га). Це – краплинні установки, малі насосні станції, зрошувальні комплекси в ОТГ. Наприклад, на Поліссі впроваджують модульні насосні станції з сонячним живленням для поливу 50–100 га садів і полів, що дозволяє фермерам автономно контролювати подачу води.

Світові практики:

Децентралізація. У багатьох країнах меліоративні системи передаються на обслуговування локальним водокористувачам (наприклад, фермерським кооперативам у Туреччині та Пакистані). Аналіз реформ в Україні та за кордоном доводить, що без участі приватного сектору (фермерів) неможливо ефективно підтримувати інфраструктуру.

Технологічні інновації. У США і ЄС широко застосовують автоматизовані системи контролю вологості, дрони для моніторингу полів, краплинні лінії із точним дозуванням води. Китай активно вводить дрони для внесення добрив та пестицидів одночасно з поливом. Впроваджуються електронні платіжні системи та телеметрія водокористування.

Альтернативні джерела. Обмеження водних ресурсів у Ізраїлі та Австралії спонукає удосконалювати опріснювальні установки і техніку повторного використання води. Наприклад, Ізраїль намагається довести питоме водоспоживання в сільському господарстві згідно «плану 2050» до рециклінгу 90% стоків.

Ринок послуг. У Румунії та Угорщині створено приватні компанії-оператори зрошення, які обслуговують великі зрошувальні системи за плату, при цьому політика тарифів прозора (плата за воду залежить від обсягу споживання). Саме за таким же зразком в Україні планується впровадження принципу «хто використовує більше води – той більше платить».

За останні 5–10 років в Україні та світі змінився підхід до гідротехнічної меліорації. Набирають обертів інституційні реформи: передача відповідальності фермерам, створення водокористувацьких організацій, впровадження ринкових тарифів і міжнародних практик інвестування. Розроблено стратегію і законодавчі акти, що мають забезпечити відродження зрошення. Разом з тим, ситуація в Україні залишається складною: колишні потужності зрошення мають бути переорієнтовані (зокрема після руйнування Каховки) на маловодні регіони, а держава мусить шукати ефективні партнерства з приватним сектором. Вирішенню проблем допомагають системний моніторинг земель, модернізація інфраструктури, збалансовані тарифи та активна участь громад у водогосподарстві. Самоорганізація водокористувачів (через ОВК), прозорий облік і сучасні технології – шлях до стабільних врожаїв навіть у зоні ризикованого землеробства та ресурсозберігаючої іригації.

ЛЕКЦІЯ 3. Гідротехнічні меліорації: реформування в сфері дренажу

Гідротехнічна меліорація – це комплекс заходів із поліпшення ґрунтового та водного режиму земель (зрошення, дренаж, осушення та двостороннє водорегулювання), що підвищує їхню продуктивність. За сучасних кліматичних викликів (посухи й повені) інтегровані системи управління вологістю ґрунту стають ключовими для стійкого землеробства. Так Л.Воротинцева та співавт. (2025) підкреслюють, що Україна має низький коефіцієнт водозабезпеченості і що війна – один із головних чинників ризиків для зрошувального сектору і сталого управління ґрунтами. Водночас 70% площ поливних земель постраждало внаслідок воєнних дій. Тому розвиток і реконструкція гідромеліоративних систем є наразі однією з пріоритетних задач аграрної політики.

4.1. Дренаж як складова гідротехнічних меліорацій

4.2. Сучасний стан і проблеми дренажних систем

Нерівномірна вологозабезпеченість. Більше половини території України має неоптимальні умови вологозабезпечення, що погіршується зміною клімату. У зоні Степу та Лісостепу без зрошення раціональне землеробство неможливе, на Поліссі навпаки – без дренажу ґрунти перезволожуються. Через це кліматичні зміни призводять до водного стресу – як посушливого, так і підтоплень.

Низьке використання потенціалу. В Україні існує 5,5 млн га меліорованих земель (3,3 млн га осушувальних), але фактично використовується лише ~20% площ зрошення та <10% дренажу. Існуючі системи недофінансовуються (особливо дренаж) і переважно утримуються за рахунок держбюджету, що робить їх уразливими.

Централізоване управління. До 2022 р. керування системами дренажу/зрошення було надмірно централізованим. За стратегією до 2030 р., їхнє оновлення гальмувалося слабкою інфраструктурою, низьким самофінансуванням та відсутністю нових інвестицій. Дослідники відзначають, що стан меліоративної інфраструктури нині критичний і потребує докорінної зміни підходу.

Агровиробничі потреби: Сучасне землеробство вирощує вологолюбні та ресурсозатратні культури (кукурудза, соя), що потребують гарантованого водопостачання. Воропай (2021) показав, що реконструкція дренажів має враховувати заплановані культури й вивести системи на режим ефективного водорегулювання протягом усього вегетаційного періоду.

Підвищення ефективності. Внаслідок впровадження дренажу й зрошення врожайність культур зростає в 2–3 рази порівняно з суховими умовами. Водночас розроблення стійких мереж зрошення та дренажу (зокрема – технологій точного поливу) дозволяє знизити водоспоживання без втрати врожайності. За розрахунками фахівців ІВПіМ НААН, саме впровадження таких систем є ефективним заходом адаптації агровиробництва до змін клімату.

4.3. Реформування та управління системами дренажу

Нормативна база: У 2019 р. уряд затвердив *Стратегію зрошення та дренажу до 2030 року* (Розп. КМУ №688-р), що визначає сучасні підходи та принципи водокористування. Стратегія наголошує на необхідності залучення **приватного капіталу (державно-приватне партнерство)** і переорієнтації водокористування до басейнового принципу. У 2020 р. ухвалено «Стандарти екологічної безпеки зрошення та дренажу» (Постанова КМУ №766), що запроваджують двохкомпонентні тарифи та екологічні вимоги на водопостачання. Існує державна

програма компенсацій — наприклад, 50% відшкодування витрат фермерів на відновлення наявних систем зрошення (Пост. КМУ №628 від 16.03.2022).

- **Законодавчі новації:** У лютому 2022 р. Верховна Рада прийняла Закон «Про організації водокористувачів та стимулювання гідротехнічної меліорації земель» (№ 2079-IX). Цей закон створює правову основу для передачі меліоративної інфраструктури в управління водокористувачів. Фермерам дозволено формувати **громадські об'єднання водокористувачів (ГОВ)** і безкоштовно приймати на баланс канали, насосні станції, дренажні мережі. Мета – децентралізувати радянську систему і передати контроль за локальними мережами на рівень господарств.

- **Інституційні зміни:** Для реалізації реформи створено Державне агентство з розвитку меліорації, що перейняло функції Держводагентства. Із часу ухвалення закону більше 50 ГОВ добровільно утворені (переважно на Півдні України). Водночас основна інфраструктура головних каналів поки що залишається в держвласності, що гальмує передачу систем фермерам. Щоб вирішити це, розроблено законопроект №7577 «Про операторів меліоративних систем» (першочитання червень 2023), який передбачає створення державних неприбуткових операторів для управління магістральними спорудами з прозорим тарифоутворенням (фіксована плата за обслуговування + змінна за обсяг водопостачання).

Роль ГОВ: На практиці ГОВ показали ефективність. Звіт Київської школи економіки наводить приклад Житомирської області, де фермери-учасники ГОВ відновили місцеву меліоративну систему, ліквідували регулярні затоплення полів і почали суміжні зрошувальні роботи. В результаті врожайність культур піднялася на 25%. Такі історії успіху демонструють, що передача активів користувачам за інтересом галузі дозволяє **економити воду та скорочувати витрати** на електроенергію для насосів. На громадських форумах 2023–2024 років аграрії

активізувалися (понад 100 учасників зібралися на півдні України), вимагаючи пришвидшення реформи та врахування їхніх пропозицій.

4.4. Інтегроване управління зрошенням і дренажем

Зрошення систем зрошення та дренажу дозволяє управляти водним балансом комплексно. Одним із таких підходів є **контрольоване осушення (controlled drainage)**, коли на дренажному випуску встановлюють регулювальну споруду. Це дає можливість затримувати воду в полі у сухі періоди та спускати її під час надлишку. Досвід Північної Кароліни (США) показує: правильно налаштоване «контрольоване осушення» не тільки знижує втрати поживних речовин у воду, а й **зберігає вологу в ґрунті під час посухи**, що підвищує врожайність. Такий приклад підтверджує, що за сучасних посушливих кліматичних умов управління ґрунтовими водами дає подвійний ефект – зниження стресу від посух і менші втрати N/P.

Приклад системної меліорації. Одна з цілей реформи – поєднати дренаж і зрошення у «двосторонні» системи (dewator, water-efficient). На підтвердження цього, Г.Воропай (2021) доводить: **найдоцільніше модернізувати дренажі, будуючи на них системи зрошення**, ніж обмежуватися лише організацією стоків. Він показує, що введення наявних осушувальних систем елементів поливу економічно вигідніше та підвищує гнучкість водного режиму ґрунту. Тобто сучасний трактор із дощувальною машиною може використовувати накопичену в ґрунті після дренажу вологу, а також поливати поля в сухі періоди, що робить агровиробництво більш стійким.

На Півночі України (Житомирщина) ГОВ «Лесині джерела» перевернули традиційний вектор з боку осушення на додаткове зрошення. Їхній досвід показав, що навіть скромні фермерські проєкти з управління гідросистемами можуть суттєво підвищити продуктивність (до +25% врожайності кукурудзи) шляхом одночасного осушення зайвих вод і поливу в посуху.

У США, крім прикладу контрольованого осушення на Каролінській рівнині, активно використовуються **зрошувально-дренажні системи** на рівнинних землях Мідвесту: там комбінують тягнучі канали з насосами, що повертають воду у роботу під час посух (повністю аналогічно іригації з повторним осушенням). В Австралії та Ізраїлі застосовують передові фільтраційні та опріснювальні технології, доповнюючи меліорацію новими джерелами води (ставки, опріснювальні станції).

Фінляндія, Німеччина і Нідерланди мають понад 60–80% меліорованих земель. Хоча там переважно осушують болота, на узбережжі вже давно розвинені меліоративні системи «двобічної дії». Голландці, наприклад, готують свої системи до інтенсивніших опадів за рахунок зворотних насосів і контрольованих шлюзів. Такий «екосистемний» підхід дозволяє їм зберігати родючість ґрунту й уникати надмірної сухості чи заболочення.

4.5.Відновлення гідромеліоративних об'єктів пошкоджених внаслідок воєнних дій

В умовах повномасштабної війни меліоративні системи потребують відновлення. Ураження каналів та насосних станцій, забруднення ґрунтів метадими вибухів – усе це знижує ефективність дренажу. На цей час в пріоритеті: **а) відбудова гідромеліоративних об'єктів** (попри руйнування дамб і рукавів); **б) очищення і знезараження вод та ґрунтів** (за участі військових інженерів і природоохоронців); **в) адаптація систем до нового балансу опадів та посух**. Науковці наголошують, що участь фахівців із відновлення довкілля є критично важливою для цілісності меліоративних систем. Зокрема, ще на «Водному форумі» 2025 року експерти ІВПіМ підкреслили: інтенсифікація зрошення й дренажу – стратегічний напрям для відбудови аграрного сектору країни у воєнний і післявоєнний періоди. Створено план «Інвестиції у водну безпеку» (при Нацраді відновлення), який закладає відновлювальні та модернізаційні роботи у фінансовий порядок денний на найближчі роки.

Нормативна база

Для майбутніх агрономів важливо знати основні нормативні акти:

Закон України “Про організації водокористувачів...” (2079-IX, 2022) – легалізував ГОВ, заклав підґрунтя реформ і стимулює приватні інвестиції у меліорацію.

Розпорядження КМУ № 688-р (2019) «Стратегія зрошення та дренажу до 2030 року» – визначає цілі, напрями та очікувані результати в розвитку меліорації.

Постанова КМУ № 766 (2020) «Стандарти екобезпечного зрошення і дренажу» – містить вимоги щодо якості поливної води, двокомпонентні тарифи і моніторинг якості ґрунтів при меліорації.

Постанова КМУ № 205 (2017) «Порядок використання коштів на розвиток зрошення та осушення» – регламентує механізми держфінансування і компенсацій (певні програми дотацій).

Басейнове управління водними ресурсами. Згідно з Водним кодексом та європейською практикою, меліорацію треба вписувати у плани управління річковими басейнами. Нові вимоги ЄС з охорони ґрунтів (EU Soil Strategy) також заохочують меліоративні заходи, що зберігають родючість та запобігають деградації.

Реформа гідротехнічної меліорації направлена на забезпечення стійкого розвитку сільського господарства. Інтегроване управління водою (одночасне використання дренажу і зрошення, накопичення дощової води, рециркуляція стоків) стає неодмінним. При цьому наукові дослідження (Vorotyntseva et al., 2025, Voropay, 2021) підкреслюють важливість скоординованого підходу «ґрунт–вода–рослина», де у центрі уваги – **збереження здоров’я ґрунту** і підтримка екологічної рівноваги. Для магістрів агрономії це означає: знати технічні аспекти меліоративних мереж, законодавчу рамку та найсучасніші практики (як-от цілеспрямоване «контрольоване

осушення» і точне зрошення), а також усвідомлювати, як зміни клімату та чинник війни формують майбутнє полів.

4.5. Дренаж у системі адаптації сільського господарства до змін клімату

Лекція 5. Агротехнічні меліорації ґрунтів

5.1. Сутність та основні напрями агротехнічної меліорації

Агротехнічна меліорація являє собою систематичний комплекс організаційно-господарських та технологічних заходів, спрямованих на докорінне поліпшення стану ґрунту. Основна мета агротехнічної меліорації — регулювання та оптимізація фізичних, хімічних та біологічних властивостей ґрунту (його родючості) через сільськогосподарські практики, включаючи обробіток, сівоzmіни, внесення добрив та використання спеціалізованих агроприймів. Агротехнічні меліорації є фундаментальною складовою загального меліоративного комплексу, поряд із гідротехнічною, хімічною та агролісомеліорацією.

Для магістрів, які спеціалізуються на «Охороні та технологіях відновлення ґрунтів», агротехнічні меліорації є основним інструментом для досягнення цілей сталого розвитку та нейтрального рівня деградації земель (Land Degradation Neutrality). Ефективність агротехнічної меліорації у сучасному агросекторі визначається її здатністю забезпечувати не тільки високу продуктивність, але й довгострокову екологічну стійкість.

5.2. Регенеративне землеробство як сучасна концепція управління станом ґрунтів

Сучасна парадигма агротехнічної меліорації значно еволюціонувала, відходячи від енергоємної та ґрунтодеградуючої традиційної полицевої оранки. Зростаюче антропогенне навантаження та глобальні кліматичні виклики зумовили перехід до ґрунтозахисних систем обробітку. Ключовим напрямом цієї еволюції є **регенеративне землеробство**.

Регенеративне землеробство розглядається як інтегрований підхід, метою якого є не лише збереження, але й активне відновлення екосистем, зменшення вуглецевих викидів та забезпечення продовольчої безпеки без втрати прибутковості. Цей підхід набув глобального пріоритету та відповідає новим вимогам Європейського Союзу щодо скорочення використання агрохімікатів.

Світова аграрна спільнота, зокрема DLG (Німецьке сільськогосподарське товариство), виділяє **п'ять базових принципів регенеративного землеробства**, які формують основу сучасної агротехнічної меліорації: мінімізація або повна відмова від обробітку ґрунту; збереження постійного покриву (мульчі); різноманітність сівозмін; підтримка живих коренів у ґрунті протягом всього року; та інтеграція тваринництва.

5.3. Сучасні системи обробітку ґрунту та їх меліоративне значення

Обробіток ґрунту є центральним елементом агротехнічних меліорацій, який безпосередньо впливає на фізичну структуру, водний та тепловий режим, а також біологічну активність ґрунту.

Система нульового обробітку (No-Till):

Принципи та механізми: Технологія No-Till передбачає повну відмову від будь-якого механічного впливу на ґрунт, за винятком прямого висіву. Родючість ґрунту формується переважно за рахунок накопичення рослинних решток та сидератів, які залишаються на поверхні.⁶

Меліоративний ефект: No-Till забезпечує максимальне накопичення органічної речовини, ефективно захищає ґрунт від водної та вітрової ерозії і значно підвищує його вологоутримуючу здатність. Ключовим елементом успіху є сівозміна та використання сидератів, які, завдяки своїй кореневій системі, не лише покращують

структуру, але й виконують роль боротьби з бур'янами, що традиційно була функцією оранки.⁶

Виклики впровадження: Незважаючи на значні екологічні переваги, перехід на No-Till пов'язаний із суттєвими труднощами. По-перше, це висока початкова вартість спеціалізованої техніки для прямого висіву. Цей фінансовий бар'єр створює протиріччя між екологічною необхідністю регенеративних практик та економічною доступністю для середніх та малих господарств. По-друге, в перші роки на ґрунтах середнього та важкого гранулометричного складу може спостерігатися погіршення фізико-хімічних параметрів родючості. Крім того, наявність пожнивних решток може сприяти накопиченню джерел інфекції та шкідників, що вимагає ретельної системи захисту.

Стрічковий обробіток (Strip-Till):

Концепція: Strip-Till є проміжним етапом між традиційною та нульовою системами. Обробка ґрунту здійснюється лише вузькими смугами (стрічками), куди в подальшому висівається насіння, тоді як міжряддя залишаються необробленими та покритими мульчею.

Практична адаптація: Ця технологія дозволяє зберегти значну частину переваг No-Till (зниження ерозії та витрат пального), забезпечуючи при цьому швидше прогрівання посівного ложа, що особливо важливо в регіонах з прохолодною весною. Аграрії Полтавщини, Дніпропетровщини та Черкащини активно впроваджують фокус на Strip-Till та прямий висів як ефективні заходи агротехнічних меліорацій.

5.4. Сівозміни, покривні культури та сидерація у відновленні ґрунтових

Сівозміни та сидерати (зелене добриво) є класичними, але надзвичайно актуальними заходами АТМ. Їхня роль набуває особливого значення в контексті

мінімальної обробки, оскільки вони компенсують відсутність механічного змішування ґрунту.

Ефективність сівозмін ґрунтується на постійному надходженні органічної речовини — післяжнивних корневих та листо-стеблових решток. Ця органічна речовина є критично важливим енергетичним матеріалом, необхідним для мікробіологічних процесів, формування поживного режиму та накопичення стабільного гумусу в ґрунті.

Для збереження та покращення меліоративного стану зрошуваних земель у сухостеповій зоні України, де ґрунти зазнають водно-сольового навантаження, систематичне використання сівозмін, сидератів та органічних добрив є життєво необхідним. Це зменшує потребу в інтенсивному внесенні мінеральних добрив і сприяє відновленню агрохімічних властивостей.

5.5. Фітомеліорація та біологізація землеробства

Зменшення механічної обробки (як у No-Till) супроводжується зростанням потреби в біологічних заходах, які мають компенсувати функції оранки, зокрема, щодо розкладання поживних решток та контролю патогенів.

Роль біодеструкторів. Застосування біодеструкторів (наприклад, Екостерн) стає обов'язковим елементом технології. Ці препарати містять живі клітини бактерій (*Bacillus subtilis*, *Azotobacter*, *Enterobacter*) та грибів (*Trichoderma lignorum*, *T. viride*), які прискорюють розкладання решток. Загальне число життєздатних клітин може сягати $2,5 \times 10^9$ КУО/см³. Біодеструктори не лише прискорюють гуміфікацію, а й виступають антагоністами патогенних мікроорганізмів, сприяючи біологічному оздоровленню ґрунту.¹

Спеціалізована фітомеліорація. Вирощування певних культур, таких як гречка, сприяє сталому розвитку аграрного сектора та має агротехнічну цінність.¹ Вона є не

лише джерелом високоцінних харчових продуктів, а й здатна покращувати структуру ґрунту та його фітосанітарний стан.

АТМ та Кліматична Стійкість: Вуглецеве Землеробство

Одним із найбільш значущих міждисциплінарних аспектів АТМ є її роль у секвестрації вуглецю та боротьбі з глобальним потеплінням. Ґрунт визнаний критичним союзником клімату.¹

Механізми секвестрації: Вуглецеве землеробство ґрунтується на впровадженні відповідних агротехнічних заходів, які максимально зменшують порушення ґрунту (мінімізація обробітку) та забезпечують постійне надходження органіки (покривні культури). Це мінімізує мінералізацію органічної речовини та сприяє накопиченню вуглецю. Зменшення використання добрив також знижує викиди парникових газів.

Потенціал України: Україна, маючи значні площі ріллі, володіє величезним потенціалом для секвестрації ґрунтового вуглецю. Попередні оцінки свідчать, що загальний потенціал накопичення вуглецю в українських ґрунтах може досягати **757,7 мільйона тонн**. Впровадження регенеративного землеробства стає стратегічним кроком для країни, оскільки дозволяє узгодити сільськогосподарську діяльність із кліматичними стандартами ЄС.

Економіка вуглецю, спрямована на секвестрацію, відкриває для фермерів доступ до вуглецевих ринків. Хоча періодичний моніторинг, відбір проб ґрунту та аудит для отримання вуглецевих кредитів є високозатратними процесами, вони необхідні для валідації результатів і є новою економічною вигодою.¹⁴ Майбутні фахівці повинні освоїти моніторинг ґрунтового вуглецю.

У регіонах із дефіцитом вологи, як-от сухостепова зона України (південні чорноземи, темно-каштанові ґрунти), агротехнічна меліорація відіграє вирішальну роль у вологозбереженні та боротьбі з вторинною деградацією.

Проблема зрошуваних земель: Тривале зрошення (40–50 років і більше) та фільтрація з каналів призводять до інтенсивного водно-сольового навантаження, підйому ґрунтових вод, вторинного засолення та погіршення фізико-механічних властивостей. Класична гідромеліорація, без належної АТМ, часто виявляється нестійкою.

Ґрунтозахисні технології, такі як No-Till та використання покривних культур, підвищують здатність ґрунту утримувати вологу.⁵ Це критично важливо в умовах непередбачуваної погоди та знижує потребу в інтенсивному, потенційно засоляючому зрошенні.

Агролісомеліорація: Насадження лісосмуг є формою меліорації клімату, що покращує водний режим, запобігаючи ерозії та сприяючи снігозатриманню.

З огляду на необхідність прогнозувати управління водними та земельними ресурсами на 50–100 років уперед, агротехнічна меліорація (вологозбереження, підвищення вмісту органічної речовини) є стійкішою, менш капіталоемною та екологічно безпечнішою відповіддю на дефіцит води, ніж лише масштабні іригаційні проекти.

Таблиця __ **Інтегровані підходи агротехнічна меліорація у контексті викликів стійкого розвитку**

Інтегровані підходи агротехнічна меліорація у контексті викликів стійкого розвитку

Виклик	Інтегрований підхід	Дисциплінарний аспект	Очікуваний результат
--------	---------------------	-----------------------	----------------------

Глобальне потепління	Вуглецеве землеробство (No-Till, покривні культури)	Клімат Екологія Ґрунту	Секвестрація отримання вуглецевих кредитів ¹³
Водний дефіцит/Посухи	Збереження постійного ґрунтового покриву	Водні ресурси / Фізика Ґрунту	Підвищення здатності ґрунту утримувати вологу, зниження випаровування ⁵
Кислотність Лужність ґрунту	Хімічна меліорація, інтегрована з біочаром	Хімія ґрунту Агрохімія	Покращення фізико-хімічних властивостей (наприклад, підвищення pH) ¹
Деградація родючості	Диверсифікація сівозмін, сидерати, біопрепарати	Агрономія Мікробіологія	Накопичення гумусу, покращення

5.6. Агротехнічні меліорації у відновленні деградованих ґрунтів

Військово-техногенна деградація ґрунтів внаслідок збройної агресії Росії створює унікальні та масштабні виклики для **агротехнічна меліорація**. За оцінками,

збитки земельним ресурсам України перевищують 400 млрд грн, а повне відновлення родючого шару може зайняти майже 30 років.

Фітомеліорація забруднених земель. Оскільки хімічне забруднення є стійким, довгострокова стратегія відновлення включає фітомеліорацію. Науковці НААН пропонують вирощувати енергетичні культури, такі як **міскантус гігантський**, на забруднених військовими діями ґрунтах. Міскантус допомагає відродити ґрунти завдяки потужній кореневій системі та здатності до фітостабілізації або фітоекстракції

Агротехнічні та фітомеліоративні заходи для відновлення ґрунтів, пошкоджених воєнними діями в Україні

Тип Пошкодження	Наслідок для Ґрунту	Рекомендований Захід АТМ / Меліорації	Наукове Обґрунтування / Джерело
Рух важкої техніки	Глибоке ущільнення, зміна гідравлічних властивостей	Глибоке щільювання/розпушування (після пенетрометричного вимірювання)	Використання алгоритму дій AgriLab, адаптація світового досвіду ¹⁸
Бомбардування, обстріли	Бомбтурбація, змішування горизонтів, хімічне	Вирівнювання покриву, фітомеліорація (вирощування	Використання міскантусу для біологічної реабілітації

	забруднення (ВР)	енергетичних культур)	забруднених ґрунтів ²⁰
Пожежі та вигорання ОР	Знищення мікрофлори, втрата гумусу, порушення водного балансу	Внесення органічних добрив, застосування біодеструкторів (<i>Bacillus subtilis</i> , <i>Trichoderma spp.</i>)	Відновле ння корисної мікрофлори та прискорення гуміфікації решток ¹¹
Вторинне засолення (Каховська ГЕС)	Деградаці я земельних ресурсів, опустелювання	АТМ, спрямована на вологозбереження та відновлення зрошувальних систем	Аналіз наслідків катастрофи, обґрунтування перспектив відновлення ²²

АТМ має вагоме економічне обґрунтування, оскільки її стійкі практики знижують залежність від дорогих вхідних ресурсів (пальне, добрива).

Світовий досвід підтверджує, що інтеграція No-Till та покривних культур призводить до довгострокового зростання прибутковості.

Кейс Центральної Індіани (США): Дослідження, проведене на полях із сівозмінною кукурудза-соя, де протягом щонайменше 15 років застосовувалася комбінація No-Till та покривних культур, продемонструвало прямий економічний ефект. Було встановлено, що таке поєднання практик збільшує прибутковий врожай та/або зменшує оптимальні рівні внесення азотних добрив. Це призвело до збільшення чистого прибутку на акр для фермерського господарства.²³ Це підтверджує, що

екологічно відповідальна АТМ може бути економічно вигідною в довгостроковій перспективі.

Кейс Kirk Farm (Шотландія): Господарство площею 150 га інтегрувало покривні культури у свою сівозміну. Основні переваги, які були отримані, включали захист ґрунтів від ерозії, збільшення вмісту органічної речовини та покращення циклічності поживних речовин.²⁴

Показники Економічної Оцінки АТМ

Оцінка ефективності меліорації має бути комплексною, включаючи не тільки агрономічні, але й економічні та екологічні показники ¹:

1. **Коефіцієнт повторного використання меліорованих земель.**
2. **Питома вага інтенсивних культур у загальній посівній меліорованій площі.**
3. **Водомісткість виробництва/Водовіддача:** Цей показник є критичним для зрошуваних територій, оцінюючи ефективність використання водних ресурсів. Він може розраховуватися в натуральній формі (витрачена зрошувальна вода на гектар до одержаного врожаю) та у вартісній формі (витрати води на \$1000\$ грн валової продукції).¹

Економічні Виклики Повоєнної АТМ в Україні

В умовах повоєнної аграрної галузі, питання ресурсозбереження та відновлення виходять на перший план.²²

- **Наслідки Каховської катастрофи:** Кейс-стаді, присвячений екологічній катастрофі на Каховській ГЕС, ілюструє необхідність комплексної АТМ. Руйнування ГЕС призвело до масштабних наслідків для земельних ресурсів та загрози опустелювання. Відновлення вимагає не лише ліквідації наслідків

затоплення, але й обґрунтування перспектив відновлення аграрного сектору через інтегровані меліоративні заходи.²²

- **Професійна Підготовка:** Масштаб військово-техногенної деградації та кліматичних викликів вимагає від майбутніх фахівців міждисциплінарних знань, що охоплюють аспекти екологічної безпеки, ґрунтознавства та економіки ресурсозбереження.

Лекція 6. Меліоративні заходи з охорони ґрунтів від ерозії та дефляції

6.1. Водна ерозія та дефляція як процеси деградації ґрунтів

Ерозія та дефляція ґрунтів – це глобальна проблема, що призводить до втрати родючого шару і зниження врожайності. За останнє сторіччя в світі через ерозію втрачено понад 400 млн га ріллі, в Україні 4 млн га вважається деградованими.

За різними оцінками, в Україні маємо 8–15 млн га деградованих земель, з яких до 13 млн га пошкоджені водною ерозією, а понад 6 млн га – вітровою. Деградація ґрунтів щорічно зменшує врожайність, створюючи загрози продовольчій безпеці. Зокрема, FAO констатує, що запровадження ґрунтозахисних технологій (ротації культур, покривних культур, безвідвальної обробки) може відновити виробництво і зменшити ерозію. Слід зауважити, що нинішня військова агресія та кліматичні зміни ще більше ускладнюють ситуацію: інтенсивні зливи поглиблюють водну ерозію, а бойові дії руйнують корисні землі і посилюють ерозійні процеси.

6.2. Протиерозійна організація території та агротехнічні заходи лісомеліоративні та фітомеліоративні заходи захисту ґрунтів

Захист ґрунтів від ерозії полягає у комплексі організаційних, агротехнічних, лісомеліоративних, інженерних та біоінженерних технологій. Протиерозійне землеробство – це цілісна система захисту ґрунтів, що включає агрофізичні, агрохімічні, агротехнічні, інженерні та лісомеліоративні заходи. Серед основних напрямків:

Організаційно-господарські заходи. Раціональне планування і спеціалізація землекористування згідно з ерозійною небезпекою територій (наприклад, зменшення масштабів суцільного обробітку, об'єднання ділянок «по контуру рельєфу», організація захисних зон між полями). Також до заходів належать системи

моніторингу стану ґрунтів, страхові та фінансові стимули за впровадження ґрунтозахисних технологій (податки на деградовані землі, субсидії за захист).

Агротехнічні заходи. Збереження рослинного покриву і вологозберігаючі технології. У тому числі – безвідвальна обробка ґрунту та мульчування післяжнивними рештками, що зменшує розмивання верхнього шару. Висів покривних культур і багаторічних трав (наприклад, люпин, фацелія, бобові) у міжзбиральний період живлять ґрунт і захищають його від змиву. Досліди у Лісостепу показали, що застосування плоскорізного або чизельного обробітку разом з меліоративним дренажем призводить до 1.5–15-кратного зниження поверхневого стоку води, що суттєво зменшує ерозію[6]. Також горизонтальне (контурне) орання та смугове розташування культур поліпшують фільтрацію води і стримують стік.

Лісомеліоративні (фітомеліоративні) заходи. Захисні лісосмуги та ґрунтозахисні насадження уздовж полів/схилів виконують роль живих бар'єрів. Висадка вітрозахисних смуг (спеціальні породи дерев і чагарників) зменшує швидкість вітру і знижує дефляцію ґрунту. Такі смуги традиційно застосовують у степових регіонах України та Південній Україні. Для захисту схилів карпатських агроландшафтів використовують насадження листяних дерев і чагарників разом з трав'яним покривом.

Інженерно-меліоративні заходи. Терасування та земляні греблі на крутих схилах дозволяють розбити довжину потоку води і затримати ґрунт. Створення меліоративних каналів і водовідвідних споруд (суспензійні лотки, протиерозійні дамби) відводить надлишкову воду та осаджує еродовані частинки. Наприклад, порівняльні експерименти свідчать: на ділянках з терасами, лісосмугами та дренажною мережею (антиерозійна організація ландшафту) відстань водного стоку скорочується в 4 рази порівняно з традиційним розташуванням полів[7][6].

Біоінженерні рішення. Комбінація рослинних методів з технічними конструкціями. До прикладів належать «живі палізади» – стрічки з насаджених гілок

або коріння (верба, осика тощо), які укріплюють схили, а також висадка стрижневих трав (ветивер, спориш тощо) для укріплення ґрунту. Хоча в літературі такі методи менш поширені в Україні, світовий досвід (наприклад, проекти фітомеліорації на крутих гірських схилах) показує їхню ефективність у стабілізації ґрунту.

Комплексний підхід передбачає поєднання різних методів з урахуванням екосистемних особливостей. За останніми дослідженнями, практики nature-based solutions (NbS) – такі як агролісомеліорація, смуги парціальних рослинних насаджень і т.д. – здатні вирішувати кілька завдань одночасно[8]. Наприклад, створення сітки лісосмуг, смуг трав та буферних зон знизило б ризик ерозії, зберігаючи водні ресурси та підвищуючи біорізноманіття. Park et al. (2025) продемонстрували, що реалізація комплексу ВМР (гравітаційні осадові басейни, прибережні трав'яні смуги, укріплення схилів) на крутих рельєфах зменшила втрати ґрунту майже на 60%[9]. Такі результати підкреслюють важливість просторово орієнтованого підходу: заходи слід впроваджувати з урахуванням особливостей кожного ландшафту і водозбору. Крім того, міжнародні рекомендації закликають поєднувати економічні стимули та законодавчу підтримку для впровадження ґрунтозахисних практик (консерваційне землеробство, зелені субсидії тощо)[2][8].

Клімат. Зміна клімату призводить до росту частоти й інтенсивності екстремальних опадів, що збільшує потенціал водної ерозії. Як відзначають Park et al. (2025), «недавні зміни клімату призвели до посилення сильних дощів, що спричинило загострення процесів ерозії ґрунту»[10]. Відтак протиерозійні системи мають враховувати майбутні кліматичні умови, обов'язково включаючи водозатримання (ґрунтоутримуючі ємності, ретикуляційні мережі) та швидке укріплення нових посівів.

Водні ресурси. Сталий облік водних потоків є ключем до боротьби з ерозією. Збереження ґрунту і води – взаємопов'язані процеси: організація «безпечних» шляхів стоку (щоб вода не змивала родючий шар), а також інфільтрація зайвої

вологи у ґрунт суттєво знижують ерозійні втрати. HBS також рекомендують використовувати заходи для поліпшення якісного і кількісного стану вод (прісні ставки, водозатримуючі споруди), що водночас стабілізує режим вологості ґрунту і зменшує стік і намулення (беручи приклад із успішних проєктів захисту водозборів)[11][12].

Біоінженерія. Залучення біологічних методів до інженерних рішень. Зокрема, насадження швидкорослих фітопасткаїв (рогоз, очерет) та живих «гібернаторів» (осокир, вільха) на берегах оросних каналів і берегів ставків підвищує міцність ґрунту. Хоча прямої літературної згадки по Україні немає, у світі застосовують живі «каркаси» з гілок (Salix-палісадні структури) на схилах, що разом із консерваційним землеробством значно зменшують ерозійні процеси. В Україні це може враховуватися при відновленні зсувонебезпечних ділянок і берегів водозаборів.

6.3. Ерозійні ризики в умовах воєнних дій та заходи щодо їх мінімізації

На окупованих і деокупованих територіях Донецької, Луганської, Миколаївської та інших областей агроландшафти зазнали руйнівного впливу: вибухами зруйновано верхній шар ґрунту, відбито вітрову стійкість мульчі й рослинності, порушено структуру ґрунту. Ці порушення призводять до механічної компакції ґрунту, втрати гумусу та порушення його водного балансу, що саме по собі інтенсифікує водну і вітрову ерозію. Наприклад, після вибухів утворюються кратери, а прилеглі ділянки позбавлені рослинного покриву – без додаткових заходів вони піддаватимуться розмиттю і осипам. У таких умовах першочергово необхідне відновлення мульчуючого покриву: як пропонують фахівці, пошкоджені ділянки слід засіяти швидкоростучими травами (фацелія, люпин, овес), а за наявності ресурсів – закрити соломною чи агроволокном.

Після боїв важливо також розрихлити й вирівняти ґрунт (щоб повернути водопроникність) і заселити корисні мікроорганізми, адже військова техніка ущільнює товщу ґрунту. Дослідники підкреслюють: вибір технології рекультивації

залежить від характеру пошкоджень і майбутнього використання землі. У практиці це означає: при високому ступені забруднення вибуховими речовинами – пріоритет демі, після нього – внесення компосту й вапнування для відновлення фізичних властивостей; у разі гострої ерозійної небезпеки – перш за все відновлення рослинного покриву та гідротехнічних споруд (канал, кар’єрів-резервуарів для затримання стоку).

Зокрема, в Донецькій і Миколаївській областях доцільно відновлювати лісосмуги і контурні смуги кукурудзи чи соняшнику, щоб уповільнити вітровий потік над полем.. Усі заходи відновлення після війни повинні інтегрувати інженерні методи з агрозаходами: лише так можна швидко стабілізувати ґрунт і запобігти розширенню ерозійних вад.

Свіжий світовий досвід свідчить про успішне поєднання підходів. Так, у США та Канаді активно впроваджують програми консерваційного землеробства (зокрема, «зелені субсидії» за сівозміни з травами, за збереження стерні та ін.). У Китаї на «Лоессовому плато» створили систему терас з агролісомеліоративними насадженнями, що за 10–15 років повернули родючість із близько нульового до високого (повідомляють міжнародні грантові дослідження з деградації земель). В Африці працює програма «Великий зелений пояс» – лінійна посадка дерев уздовж Сахари для боротьби з опустелюванням (аналогічна захисним смугам на полях).

Згідно з останніми дослідженнями (Miralles-Wilhelm 2023), **постійні травостої, буферні смуги і агролісомеліорація** сприяють одночасному підвищенню продуктивності і захисту ґрунту.

Комплексний підхід до захисту ґрунтів від ерозії базується на міждисциплінарній інтеграції: агротехнічні методи доповнюються інженерними і екологічними рішеннями, а політика стимулює інновації. Такий підхід довів свою ефективність: наприклад, комбіноване застосування ґрунтозахисних практик забезпечувало значне зниження втрат ґрунту і води. У підсумку, для успішної

боротьби з ерозією та дефляцією необхідно ґрунтовно впровадити **інтегровані** стратегії землекористування (від агрофізичних заходів до просторового планування) з урахуванням кліматичних і соціально-економічних факторів.

Лекція 7. Хімічні меліорації ґрунтів

7.1. Сутність, мета та завдання хімічної меліорації ґрунтів

Хімічною меліорацією ґрунту називають комплекс заходів, спрямованих на докорінне поліпшення його властивостей з метою підвищення продуктивності сільськогосподарських культур. Це заміна небажаних у складі ґрунтового вбирного комплексу катіонів (водню, алюмінію, заліза, мангану в кислих ґрунтах і натрію — в лужних ґрунтах на кальцій). Надмірну кислотність ґрунту усувають вапнуванням, а надмірну лужність — гіпсуванням. Хімічну меліорацію проводять до внесення добрив з метою створення оптимальної реакції ґрунтового розчину, ліпшого засвоєння елементів живлення з ґрунту і внесених добрив. Її зазвичай проводять один раз за ротацію сівозміни або за кілька років. Основне цільове завдання - створити високу буферну ємність ґрунтів, що забезпечуватиме їх стійке функціонування за різних умов зовнішніх впливів її навантажень. Хімічну меліорацію ґрунтів не слід розуміти надто спрощено тільки як спосіб нейтралізації зайвої кислотності чи лужності. Як її складові також треба розглядати способи корінного за запасного збагачення ґрунтів біогенними елементами, застосування природних і штучних меліорантів (так званих структурних меліорантів) для створення в ньому стійкого орґано-мінерального комплексу, поливні води з добавками відповідних меліоративно-активних речовин, залучення в меліоративну дію (наприклад, унаслідок плантажу) внутрішньогрунтових речовинних ресурсів та інших, у тому числі й непрямі впливи, що докорінно змінюють агрохімічну якість ґрунту.

Хімічні меліоранти – речовини або суміші речовин природного чи техногенного походження, які вносять у ґрунти з метою їх хімічної меліорації (гіпс, фосфогіпс, крейда, дефека́т, породи, що містять більш як 10 % сполук

кальцію — леси, червоно-бурі глини, кальцієво-залізовмісні шлами металургійних та інших підприємств тощо).

7.2. Кислотність ґрунту та потреба у вапнуванні

Ґрунти з підвищеною кислотністю найбільш поширені на Поліссі, в західних регіонах Лісостепу та Карпатській буроземно-лісовій області. Солонцеві комплекси і повторно осолонцьовані ґрунти трапляються майже в усіх регіонах Лівобережної України, але найбільші їх площі в Південному Степу. Регіони поширення кислих ґрунтів достатньо забезпечені вологою ($ГТК > 1$), із меншою континентальністю клімату та переважанням елювіального (промивного, застійно-промивного) типу ґрунтоутворення. У південних регіонах, навпаки, переважають дефіцит вологи та акумулятивний (непромивний) тип ґрунтових процесів. Ґрунти Лісостепу займають проміжне положення — їм притаманний як елювіальний, так і акумулятивний типи ґрунтоутворення. Вони займають майже 35 % загальної площі сільськогосподарських угідь і мають різну кислотно-основну буферну здатність. *Кисотно-основна буферна здатність ґрунту* — це його здатність протидіяти явищам підкислення або підлуження і нейтралізувати добавлення кислоти чи луги, що надійшли в нього.

Природна кислотність ґрунтів формується під час трансформування органічної частини ґрунту. За низького вмісту в рослинних рештках лужноземельних металів і білкових сполук, насамперед в анаеробному середовищі, процес бродіння завершується утворенням різноманітних органічних кислот. Вони сильно, підкислюють ґрунт, особливо за відсутності їх нейтралізаторів.

За надходження в ґрунт значної кількості органічних речовин починають інтенсивно розвиватися глейові процеси, які розхитують кристалічні ґратки

глинистих мінералів, призводять до утворення вільних оксидів алюмінію та заліза. Ці оксиди разом із реакційно-активними органічними кислотами утворюють комплекси і вимиваються з верхньої частини ґрунтового профілю.

Важливу роль у формуванні кислотно-основного режиму відіграють буферні властивості ґрунтів, як їх здатність протистояти вторинному підкисленню, чи підлуженню. Цю здатність оцінюють за **буферною ємністю** — безрозмірною величиною, яку визначають у кислотному й лужному інтервалах навантажень і зазвичай вказують за 100-бальною шкалою.

7.3. Відношення сільськогосподарських культур до реакції ґрунтового середовища

Урожай сільськогосподарських культур залежить від показника рН ґрунту, оскільки він визначає доступність поживних речовин (потенціал токсичності); активність мікроорганізмів; сприйнятливість організмів до захворювань; потенційну шкоду культурі, яку завдають деякі гербіциди.

Засвоєння елементів живлення рослинами відбувається за відповідної реакції ґрунтового середовища. Вважають, що оптимальні значення рН для засвоєння рослинами елементів живлення з ґрунту такі: азоту - 6—8; фосфору - 6,25; калію і сірки — 6-8,5; кальцію і магнію - 4,5- 6; бору, міді та цинку — 5-7; молібдену - 7-8,5.

За ступенем кислотності та лужності ґрунти поділяють на десять груп(табл. 1).

За логарифмічною шкалою, ґрунт із рН 6 у 10 разів кисліший, ніж із рН 7, а ґрунт із рН 5 у 100 разів кисліший, ніж із рН 7.

Таблиця 7.1. Групування ґрунтів за ступенем кислотності та лужності

Група	Колір на картограмі	Ступінь кислотності ґрунтів	Параметри рН	
			водного	сольового
1	Червоний	Дуже сильнокислі	<4,5	< 4,0
2	Рожевий	Сильнокислі	4,5-5,0	4,0—4,5
3	Оранжевий	Середньокислі	5,0—5,5	4,5—5,0
4	Жовтий	Слабокислі	5,5-6,0	5,0 – 5,5
5	Світло-зелений	Дуже слабокислі	6,0—6,5	5,5 – 6,0
6	Зеленим	Нейтральні	6,5-7,0	6,0 – 7,0
7	Голубий	Слаболужні	7,0-8,0	-
8	Синій	Середньолужні	8,0—8,5	-
9	Фіолетовий	Сильнолужні	8,5-9,0	-
10	Коричневий	Дуже сильнолужні	> 9,0	-

Карту, на якій нанесено ареали кислих ґрунтів за ступенем кислотності називають **картограмою кислотності**. Її використовують: 1) під час розробки проектів меліорації; 2) нарізання полів сівозмін і планування розміщення сільськогосподарських культур; 3) бонітування та оцінювання земель; 4) диференціації вапнування та застосування добрив.

Для кожного виду рослин є сприятливіший для росту і розвитку інтервал реакції ґрунтового середовища. Для більшості рослин і ґрунтових мікроорганізмів оптимальною є слабокисла і дуже слабокисла реакція ґрунтового середовища ($pH_{\text{сол}}$ 6—7). Проте відомі культури, для яких найліпшим є кисліше середовище, але вони добре ростуть за широкого інтервалу рН (табл. 2).

Таблиця 2. Оптимальна реакція (рН) ґрунтового середовища для сільськогосподарських культур

Культура	Оптимальний рівень рН	Допустимі відхилення рН в інтервалі		Стійкість до підкислення ґрунту
		кислотному	лужному	
Рис	4,0-6,0	3,8	6,3	Дуже сильна
Люпин	4,5-6,0	4,2	6,4	»
Бруква	4,8-5,5	4,5	6,2	»
Серадела	4,8-6,0	4,5	6,2	»
Картопля	5,0—6,5	4,8	7,0	Сильна
Тимофіївка	5,0-7,5	4,8	8,0	»
Овес	5,0—,7	4,6	8,0	»
Льон	5,5-6,5	5,0	6,8	»
Морква	5,5-7,0	5,0	7,5	»
Жито озиме	5,5-7,5	5,0	7,7	»
Просо	5,5—7,5	5,2	8,0	»
Вика	5,7—6,4	5,5	7,0	»
Соняшник	6,0-6,8	5,5	7,3	Середня
Конюшина	6,0-7,0	5,5	7,5	»
Кукурудза	6,0—7,0	5,5	7,5	»
Горох	6,0-7,0	5,8	7,6	»
Пшениця яра	6,0-7,5	5,5	7,8	»
Буряк кормовий	6,2 – 7,5	5,5	8,0	»
Помідор	6,3—6,7	5,8	7,2	»
Пшениця	6,3—7,5	5,8	7,8	»

Огірок	6,4-7,0	5,6	7,5	»
Цибуля	6,4-7,9	6,0	8,2	»
Соя	6,5-7,1	6,0	7,5	»
Капуста	6,5-7,4	6,0	7,8	Слабка
Мак	6,8—7,2	6,0	7,8	»
Ячмінь	6,8—7,5	6,0	8,0	»
Буряк	7,0-7,5	5,7	8,2	»
Люцерна	7,0-8,0	6,0	8,8	»

За відношенням до кислотності ґрунту, а відповідно, і за реакцією на вапнування сільськогосподарські культури умовно поділяють на п'ять груп.

Перша група культур - це найчутливіші до кислотності ґрунту рослини, які потребують нейтральної або слаболужної реакції ґрунтового розчину (люцерна, буркун, буряк, часник, капуста білоголова, салат, шпинат, селера, гірчиця, яблуня, вишня, слива, смородина). Вони активно реагують на внесення вапна навіть на слабокислих ґрунтах.

Рослини-кальцієфіли (айстра степова, порізняк проміжний, модрина європейська, кунжут, виноград, маслина та ін.) пристосовані до життя на ґрунтах; збагачених кальцієм, а також у місцях виходу вапняків, крейди та інших кальцієвмісних порід.

Друга група культур — потребує слабокислої та близької до нейтральної реакції ґрунтового розчину. Вони добре реагують на вапнування не лише сильно- і середньокислих, а й слабокислих ґрунтів (пшениця, кукурудза, ячмінь, соя, горох, соняшник, квасоля, боби кормові, вика, конюшина, огірок, цибуля, капуста цвітна, груша, агрус).

Третя група культур — слабкочутливі до підвищеної кислотності ґрунтового розчину (жито, овес, просо, гречка, тимофіївка, редиска, помідор, морква, суниця). Вони задовільно ростуть у досить широкому діапазоні рН ґрунтового розчину — від кислих до слабколужних (рН 4,5—7,5), але найкращі для їх росту ґрунти зі слабокислою і близькою до нейтральної реакцією (рН 5,5—6,0). Ці культури позитивно реагують на вапнування середньо кислих ґрунтів, що пояснюється не лише зниженням кислотності, й ефектом поліпшення мінерального живлення рослин після вапнування.

Четверта група культур — потребує вапнування лише середньо- і сильно кислих ґрунтів, але погано переносить у ґрунті надлишок кальцію. Так, картопля не реагує на невелику кислотність, а льон навіть краще росте за слабокислої реакції ґрунтового розчину. На перевапнованих ґрунтах, зокрема за недостатнього внесення мінеральних добрив, насамперед калійних, знижується якість продукції: бульби картоплі дуже пошкоджуються паршею і в них знижується вміст крохмалю, а льон уражується кальцієвим хлорозом, що погіршує якість волокна. Це пов'язано не стільки з нейтралізацією кислотності, стільки зі зменшенням доступності з ґрунту бору, цинку, міді і підвищенням концентрації іонів кальцію в ґрунтовому розчині, що ускладнює надходження в рослини катіонів, наприклад калію і магнію. В сівозмінах з великою часткою картоплі й льону у разі внесення високих норм мінеральних добрив, зокрема калійних, вапнування можна проводити повною нормою. Для цього найліпше використовувати доломітове борошно, яке містить кальцій і магній. При вапнуванні знижується доступність для рослин сполук бору, цинку, міді з ґрунту, що потребує внесення їх з добривами. Виконання цих умов сприяє підвищенню продуктивності всіх культур сівозміни.

П'ята група культур — досить стійкі до кислого середовища. Рослини-ацидофіти: люпин, серадела, картопля, льон, щавель, рис та інші ростуть на

грунтах з рН 4,0-6,0, а оптимальним для них є рН 4,5-5,0. Вони погано ростуть на лужних і навіть нейтральних грунтах. Для них потреба у вапнуванні виникає лише на дуже сильнокислих грунтах. Наявність катіонів кальцію в ґрунтовому розчині знижує схожість насіння цих культур і негативно впливає на їх початковий ріст.

Деякі рослини потребують особливо кислих умов для росту (чорниця, рододендрони, каштани). Тому в деяких випадках може з'явитися необхідність у зниженні рН ґрунту. Наприклад, щоб поліпшити ріст чорниці необхідний рН ґрунту 5 і нижче. Показник рН можна знизити за допомогою елементарної сірки.

Загалом більшість вирощуваних сільськогосподарських культур позитивно реагує на ліквідацію надлишкової кислотності ґрунту після вапнування (табл. 3).

Таблиця 3. Зниження врожаїв сільськогосподарських культур залежно від кислотності ґрунту, %

Групи культур за відношенням до кислотності ґрунту і вапнування	Культура	Кислотність ґрунту.		
		<4,5	4,5-5,0	5,0—5,5
І. Переносять слабку, середню і сильну кислотність, реагують зазвичай на дуже сильну кислотність	Картопля	20	6	2
	Люпин однорічний	23	Урожай не знижується	
	Льон	32	Те саме	
ІІ. Переносять слабку і середню кислотність, реагують на вапнування сильнокислих ґрунтів	Овес	19	13	6
	Жито озиме	24	23	9
	Кукурудза	25	16	9
	Однорічні трави	25	16	10

III. Переносять слабку кислотність; реагують на вапнування сильно і середньоокислих ґрунтів	Пшениця озима	30	19	13
	Ячмінь ярий	39	24	14
IV. Знижують урожай і реагують на вапнування навіть за слабкої кислотності ґрунту	Конюшина	39	33	17
	Буряк цукровий	38	28	16

Негативна дія кислотності ґрунту на рослини складається з прямої дії підвищеної концентрації іонів водню і багатьох побічних чинників. Прямим її наслідком є погіршення розвитку кореневої системи та її вбирної здатності. Особливо чутливі рослини до підвищеної кислотності ґрунту на початку росту. Погіршується ріст і галуження кореневої системи, фізико-хімічний стан плазми клітин кореня, знижується їх проникність, тому погіршується поглинання рослинами поживних речовин ґрунту і добрив.

За високої кислотності розчину іони водню, проникаючи у великій кількості в тканини рослин, підкислюють клітинний сік. Це гальмує біохімічні процес в рослині. Кисла реакція ослаблює синтез білкових речовин, у рослинах зменшується вміст загального азоту, а кількість небілкового азоту збільшується; пригнічується перетворення моноцукрів на складні органічні сполуки. Кисла реакція негативно впливає на закладання генеративних органів. Побічна токсична дія кислотності ґрунту багатостороння. Кислі ґрунти мають **гірші** властивості (фізичні, фізико-хімічні, структуру, ємність поглинання, буферність), знижується діяльність корисних ґрунтових мікроорганізмів, зокрема азотфіксувальних, мінералізація **органічних** речовин, що зменшує доступність для рослин елементів живлення.

За підвищеної кислотності ґрунту збільшується рухливість у ньому алюмінію, заліза, мангану. До високої концентрації в ґрунтовому розчині

алюмінію особливо чутливі конюшина, люцерна, жито і пшениця (під час перезимівлі), ячмінь, горох, буряк, льон, гречка. Вони пригнічуються вже за вмісту алюмінію 20-30 мг/кг ґрунту. При цьому також погіршується фосфорне живлення рослин. Це пояснюється зв'язуванням доступних фосфатів алюмінієм залізом у нерозчинні та важкорозчинні оксиди.

Слід зазначати, що між чутливістю до кислотності та рухливістю алюмінію в ґрунті немає прямої залежності. Наприклад, льон віддає перевагу кислому ґрунту, але дуже чутливий до наявності в ньому алюмінію і мангану, а кукурудза стійка до вмісту алюмінію, але потерпає від високої кислотності ґрунту. Капуста білоголова середньочутлива до вмісту мангану, але потерпає за високої кислотності ґрунту.

У кислих, ґрунтах зменшується рухливість молібдену, тому його може не вистачати для живлення рослин, зокрема бобових. У ґрунтах з кислою реакцією, особливо піщаних і супіщаних, мало рухомих сполук кальцію й магнію, внаслідок чого порушується живлення рослин цими макроелементами.

Отже, для отримання високих урожаїв і підвищення ефективності добрив потрібно проводити вапнування кислих ґрунтів, у тому числі й чорноземів. Декальцитація чорноземів, особливо орного шару, є результатом, періодичного промивання верхньої частини профілю і різко від'ємного балансу кальцію в землеробстві.

Вапнування — внесення в ґрунт кальцію і магнію у вигляді карбонатів, оксидів або гідрокарбонатів для нейтралізації його кислотності. Це основний і найрадикальніший прийом поліпшення властивостей кислих ґрунтів.

Позитивна дія вапна полягає у:

- нейтралізації ґрунтової кислотності й заміщенні поглинених іонів водню іонами кальцію і магнію меліоранту;
- створенні оптимальних фізичних, водно-фізичних та інших умов

життя культурних рослин;

- поліпшенні азотного режиму ґрунту внаслідок активізації діяльності корисних мікроорганізмів, особливо азотфіксувальних і нітрифікувальних бактерій;

- забезпеченні живлення рослин кальцієм і магнієм;

- запобіганні виникненню мікробного токсикозу при застосуванні мінеральних добрив;

- поліпшенні умов життєдіяльності дощових черв'яків, які сприяють аерації, фільтрації й утворенню водостійких агрегатів;

- перешкоджанні надходженню в рослини важких металів і радіонуклідів;

- стимуляції розвитку корисних мікроорганізмів, які мають важливе агро- номічне значення;

- сприянні процесам знешкодження решток біоцидів (пестицидів, гербіцидів, фунгіцидів тощо);

- підвищенні ефективності внесення добрив та якості отримуваної продукції.

У ґрунтах кальцій буває у формі деяких мінералів (доломіт, кальцит та ін.) і різних солей. Водорозчинні солі кальцію утворюють у ґрунтовогому, розчині іони Ca^{2+} , які є доступними для рослин. Частина кальцію зв'язується ГВК. Нестача кальцію в ґрунті призводить до уповільнення поглинання рослинами калію й бору, тому на вапнованих ґрунтах насамперед спостерігається їх калійне і борне голодування.

На ділянках, де є лужний (вапняковий) підорний шар, (і якщо дозволяє гумусовий підорний шар ґрунту) методом глибокої оранки можна підвищити показник рН (самовапнування).

Вапняні матеріали взаємодіють з ґрунтом *за двома механізмами:*

1. поступовий перехід основ у ґрунтовий розчин із наступною реакцією з ГВК;

2. контактний обмін поверхневих часточок вапна і ґрунту, при цьому не зачіпаються внутрішні шари гранул; значення цього процесу неістотне. Усі форми вапнякових матеріалів за розчинністю можна розмістити в такий спадаючий ряд: оксиди > карбонати > силікати кальцію.

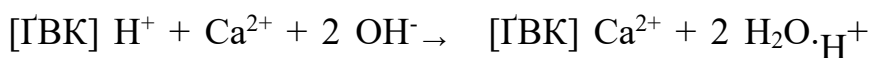
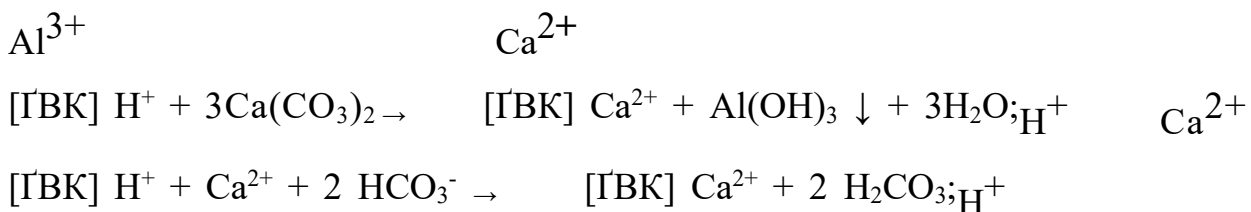
Внесене у ґрунт вапно взаємодіє з вугільною кислотою ґрунтового розчину і нейтралізує її. При цьому нерозчинний у воді карбонат кальцію поступово перетворюється на гідрокарбонат кальцію (або магнію), який набагато краще розчиняється у воді та сприяє надходженню іонів кальцію в ґрунтовий розчин:



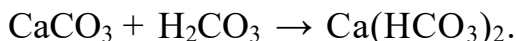
Гідрокарбонат кальцію дисоціює на іони Ca^{2+} і HCO_3^- та частково зазнає гідролізу:



Кожна часточка вапна діє на ґрунт у межах 2 мм. При цьому у ґрунтовому розчині підвищується концентрація катіонів Ca^{2+} і Mg^{2+} , які витісняють з ГВК катіони водню, алюмінію, заліза, мангану і нейтралізують ґрунт:



Вугільна кислота, що утворюється в процесі обміну іонів водню ГВК на іони кальцію, нейтралізується вапном з утворенням гідрокарбонату кальцію, який знову вступає у відповідні реакції:



Внаслідок цих реакцій у ґрунтовому розчині збільшується концентрація іонів Ca^{2+} і OH^- причому іони Ca^{2+} витісняють іони H^+ з ГВК та нейтралізують кислотність ґрунту.

Карбонати кальцію і магнію також безпосередньо взаємодіють з органічними та мінеральними кислотами і нейтралізують їх:



Отже, після внесення у кислий ґрунт повної норми вапна усуває активна й обмінна кислотність, значно знижується гідролітична кислотність. Вважають, що найсприятливіші умови для росту і розвитку більшості культурних рослин і засвоєння ними елементів живлення складаються за рН ґрунтового середовища близького до нейтрального і нейтрального, тобто від 5,5 до 7,0.

Максимальна дія вапна на зміщення показника рН ґрунту досягається у перші роки. Впродовж наступних 5 років знову відбувається поступове підкислення ґрунту і втрачається до 30 % досягнутого рівня нейтралізації. Через 7-8 років втрати досягають 50 % отриманого в перші 2 роки рівня рН. У зв'язку з цим перспективним є створення вапнувальних матеріалів пролонгованої дії, що пов'язано з вмістом широкого спектра часточок різного діаметра. Сировиною можуть бути, наприклад, відходи щебеневого

виробництва. Застосування таких матеріалів дасть змогу підтримувати постійний рівень реакції ґрунтового середовища впродовж тривалого часу.

Перехід кальцію і магнію в ГВК триває більш як 3 роки і залежить від кількості опадів, хімічного складу меліорантів, дози їх внесення, щільності складення, тонини помелу, рівномірності розподілу в ґрунті, застосовуваних добрив, мікробіологічної активності ґрунтів і т. д.

Карбонат кальцію слабо розчинний у воді (в 1 л дистильованої води розчиняється всього 13—15 мг CaCO_3), але навіть незначна кількість вуглекислого газу підвищує розчинність вапна в 60 разів. Ґрунтове повітря порівняно з атмосферним містить у 10—100 разів більше CO_2 , який виділяється під час дихання живих організмів і розкладання органічних речовин. Отже, в ґрунтах із високою мікробіологічною активністю, де кількість виділення вуглекислого газу збільшується, зростає і швидкість взаємодії вапна з ґрунтом.

Процесу розчинення вапна сприяє також наявність у ґрунтовому розчині аніонів, здатних утворювати з кальцієм і магнієм добре розчинні сполуки (неспецифічні органічні кислоти, фульвокислоти). Аніони добрив (NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) теж беруть активну участь у цьому процесі.

Хімічна активність вапнякових матеріалів великою мірою визначається розміром фракцій, з яких вони складаються, тобто тониною помелу або сумою поверхні їх часточок. Певне значення при цьому має щільність їх складення. Проте зі збільшенням дози меліоранту вплив тонини помелу знижується.

Структура кислотності провапнованих ґрунтів значно відрізняється від невапнованих за однакових значень рН у провапнованих повною нормою ґрунтах тривалий час на дуже низькому рівні знаходяться обмінна кислотність і вміст рухомого алюмінію за високого ступеня насиченості ґрунту основами. Внесення повної норми вапна на кислих суглинкових і особливо

важкосуглинкових ґрунтах іноді може бути недостатнім для досягнення оптимального значення рН.

На динаміку рівня і структуру кислотності ґрунту впливають також форми вапняних добрив. Так, на дерново-підзолистому ґрунті максимальна дія вапнякового борошна на його агрохімічні показники виявляється на 2—3-й рік, а доломітового борошна — на 5—6-й рік. Слід зазначити, що чим вищий рівень рН, досягнутий після вапнування (особливо за $\text{pH} > 6$), тим швидше відбувається наступне підкислення ґрунту, що зумовлено збільшенням втрат кальцію і магнію у разі внесенні високих норм меліоранта. Тому вапнування високими

нормами неефективне та екологічно шкідливе, оскільки призводить до посилення втрат кальцію, магнію та інших елементів живлення внаслідок вимивання. Перевапновані (завапновані) ґрунти, без урахування їхніх кислотно-основних буферних властивостей мають підвищену лужність. Це пригнічує ацидофільні рослини і призводить до непродуктивних витрат добрив, дефіциту рухомих форм мікроелементів тощо.

Екологічно небезпечними наслідками перевапнування кислих ґрунтів є:

- посилення процесів мінералізації органічних речовин;
- інтенсифікація процесів вимивання нітратів, кальцію і водорозчинних органічних речовин у підґрунтові води, емісія газоподібних сполук вуглецю й азоту в атмосферу;
- різке зміщення кислотно-основної рівноваги малобуферних ґрунтів несприятливе для вирощування традиційних для зони культур (люпину, жита, льону, картоплі тощо);
- знижується стійкість цих культур до хвороб;
- перевапнування нерідко є причиною виникнення дефіциту для рослин низки мікроелементів (міді, цинку, кобальту та ін.) через їх

трансформацію в малодоступні для рослин форми та антагоністичний взаємовплив.

Післядія явища перевапнування кислих ґрунтів може тривати 2 —3 і більше років.

Поряд зі зниженням кислотності, вапнування підвищує вміст кальцію в ґрунтовому розчині та ступінь насиченості ґрунту основами, впливає на інші властивості ґрунту. Кальцій, внесений з меліорантом, сприяє утворенню ґрунтових колоїдів, поліпшенню структури ґрунту, підвищує його водостійкість. Після вапнування поліпшуються водний і повітряний режими ґрунту та обробіток важких ґрунтів після дощу, на поверхні рідше утворюється кірка, посилюється життєдіяльність мікроорганізмів і мобілізація ними азоту, фосфору та інших елементів живлення з органічних речовин ґрунту. Вапнування сприяє розвитку азотфіксувальних бактерій (вільноіснуючих і бульбочкових). Крім того пригнічуються шкідливі мікроорганізми та знижується зараженість сільськогосподарських культур різними хворобами: капусти та інших капустяних — килою; картоплі й помідора — фітофторозом; ячменю — гельмінтоспорозом; коренеплодів — коренеїдом. Проте слід пам'ятати, що високі норми вапна можуть спричинити посилений розвиток деяких шкідливих мікроорганізмів, наприклад збудників парші картоплі, фузаріозу льону тощо.

Після вапнування ґрунтів поліпшується живлення рослин фосфором. Під дією вапна важкорозчинні фосфати алюмінію і заліза переходять у доступніші для рослин фосфати кальцію, посилюється життєдіяльність мікроорганізмів, які мінералізують органічні сполуки фосфору. Калій важкорозчинних мінералів інтенсивніше перетворюється на рухомі сполуки, а поглинений ґрунтом - витісняється в розчин, але засвоєння його рослинами внаслідок антагонізму між катіонами K^+ і Ca^{2+} не збільшується.

Крім того, вапнування впливає на рухливість та доступність для рослин мікроелементів. Сполуки молібдену переходять у більш засвоювані форми, а рухливість сполук бору, міді, нікелю і мангану навпаки, зменшується й рослини можуть відчувати їх нестачу. Тому на провапнованих ґрунтах ефективним є застосування мікродобрих, особливо під чутливі до них культури — буряк, конюшину, люцерну, льон, картоплю, гречку, цибулю та ін.

Збільшення рН ґрунту на 1,5-2,0 одиниці знижує рухливість кадмію у 4-8 разів, свинцю — в 3—6 разів, а рівень рН, що забезпечує найнижчу розчинність важких металів дорівнює 6,5. Внесення вапна в дозі 5 т/га знімає фітотоксичний ефект (здатність ґрунту пригнічувати ріст і розвиток рослин). Вапнування ґрунтів з підвищеним вмістом хрому може призвести до утворення рухомих і надзвичайно, токсичних його сполук та навіть зробити їх непридатними для вирощування сільськогосподарських культур. Тому перед вапнуванням необхідно обстежити ґрунти на ймовірний вміст у них підвищених кількостей хрому і молібдену, що є рухомими за нейтральної і слабколужної реакції ґрунту.

Внесені вапняні добрива, збагачують ґрунт кальцієм, а в разі застосування доломітового борошна — і магнієм, що дуже важливо для підвищення врожайності сільськогосподарських культур, зокрема тих, які засвоюють великі кількості цих елементів.

Найбільше кальцію втрачається з ґрунту внаслідок вимивання. На різних за складом ґрунтах залежно від культур, норм і форм вапняних та мінеральних добрив із ґрунту за рік може бути вимито від кількох десятків до 200—400 кг/га і більше кальцію. Максимальні його втрати спостерігаються на чистих парах, а під посівами знижуються, досягаючи мінімуму під багаторічними культурами суцільної сівби. За інших однакових умов кальцій в 1,5—2 і більше разів вимивається з легких за гранулометричним складом ґрунтів порівняно із

важкими. Втрати також зростають у разі внесення високих норм фізіологічно кислих мінеральних добрив.

Порівняно з кальцієм, уміст магнію в ґрунтах менший. У ґрунті магній міститься у трьох формах: у вигляді мінералів (олівін, біотит та ін.), солей (частина у вигляді карбонатів і фосфатів), а також у ґрунтовому розчині у вигляді іонів. ГВК іони магнію майже не зв'язує. Проте монтморилоніт здатний фіксувати значну кількість магнію. Підвищений вміст магнію характерний для глинистих ґрунтів.

Особливо бідні на магній сильноопідзолені кислі ґрунти легкого гранулометричного складу. Тому застосування на них магнієвмісних добрив значно підвищує продуктивність культур. Вміст обмінного магнію в ґрунтах дуже відрізняється по окремих полях і ділянках, на значній частині орних земель порушено необхідне співвідношення катіонів Ca^{2+} : Mg^{2+} і K^+ : Mg^{2+} , а вирощувані культури відчувають надлишок або нестачу магнію, для формування врожаю.

На ґрунтах з низьким вмістом магнію (менш як 90 мг/кг) доцільно застосовувати доломітове борошно в дозі 2 т/га один раз на 3 роки.

Слід зазначити, що 20—30 % вимитих з орного шару кальцію і магнію в посушливі періоди року може повертатися в ґрунт з висхідними потоками води по капілярах.

Кальцій потрібний для нормального росту надземних органів і кореневої системи рослин. У рослини він надходить упродовж усього періоду активного росту. Потрапивши в рослину, іони кальцію перебувають у ній у вільному стані, частина їх взаємодіє з органічними речовинами. Так, кальцій підвищує жаростійкість рослин, усуває токсичну дію деяких мікроелементів (міді, заліза, цинку), сприяє кращому транспортуванню вуглеводів і білкових речовин, синтезу хлорофілу, росту коренів. Дефіцит кальцію затримує ріст, листків, їх

жилки буріють (провідні пучки забиваються бурими продуктами розкладання клітковини), на них спочатку з'являються світло-жовті плями (хлоротичність), потім вони відмирають. При цьому листки, які утворилися раніше, не відчують його нестачі й залишаються нормальними: вони містять кальцію більше, ніж молоді листки, оскільки рослини не можуть його перерозподіляти.

Сільськогосподарські культури досить різняться за рівнем використання кальцію. Так, з 1 га посівів жито, пшениця, ячмінь і овес виносять 20—40 кг СаО; горох, вика, квасоля, гречка; льон - 40-60; картопля, люпин, кукурудза, буряк цукровий — 60—120; конюшина, люцерна — 120—250; капуста - 300—500 кг СаО. Потреба деяких культур у кальції і стійкість їх до кислотності не завжди збігаються. Наприклад, капуста, конюшина, люцерна, картопля, люпин засвоюють багато кальцію, але картопля і люпин нечутливі до кислотності ґрунту.

У різних частинах і органах рослин містяться різні кількості кальцію: в листках і стеблах його значно більше, ніж у насінні. Тому більша частина кальцію винесена рослинами з ґрунту з нетоварною частиною врожаю, залишеною на полі, а також із залишками кормів і підстилкою потрапляє в гній, тобто, знову повертається в ґрунт.

Вміст магнію в рослинах становить 0,01-3,0 % в перерахунку на суху речовину. Магнію, як і фосфору, найбільше міститься в молодих органах рослин і в насінні. Він засвоюється лише у формі іонів Mg^{2+} . Інтенсивність поглинання магнію залежить від концентрації іонів кальцію в ґрунтовому розчині. Рослини можуть відчувати нестачу магнію навіть за високого його вмісту в ґрунті, якщо співвідношення Са : Mg в ґрунтовому розчині перевищує 11.

Магній, на відміну від кальцію, рухоміший і може перерозподілятися рослиною зі старих листків він надходить у молоді, а після цвітіння — з

листіків потрапляє в насіння. Нестача магнію більшою мірою впливає на розвиток репродуктивних органів рослин — насіння, бульби, коренеплоди.

За недостатнього і низького вмісту магнію в рослинах необхідно вносити магнієві добрива. За високого рівня забезпеченості врожай основної продукції не зростає, так як при цьому збільшується частка вегетативної маси в урожаї сухої речовини. Для деяких культур встановлено токсичні рівні вмісту магнію: для кукурудзи - 0,55 % (прикачанний листок), люцерни - 2,0 (перед початком цвітіння); сливи - 1,1 (листки у липні), сої (фаза цвітіння) — 1,5 % маси сухої речовини.

Зернові культури хоча й менш вимогливі до забезпечення ґрунтів магнієм, сильніше реагують на його нестачу, ніж технічні та овочеві культури. Це пов'язано з тим, що коренева система злаків розміщена на невеликій глибині і слабо засвоює поживні речовини з нижніх шарів ґрунту.

Якщо для зернових культур недостатньо магнію, його вносять позакоренево у фазу кущіння й наприкінці фази виходу в трубку у вигляді розчину сульфату магнію. Доцільніше його вносити разом із карбамідом і мікроелементами.

7.4. Меліоранти для вапнування: властивості, вибір та застосування

Хімічні меліоранти кислих ґрунтів поділяють на три групи: 1) *промислового виробництва* (отримують розмелюванням твердих карбонатних порід, наприклад вапнякове і доломітове борошно); 2) *відходи промисловості* з високим умістом вапна (металургійні шлаки, цементний пил, дефекат, сланцева зола та ін.); 3) *місцеві меліоранти* з пухких (легких) карбонатних порід (туф, гаж, мергель та ін.), які зазвичай не потребують розмелювання.

У меліорантах промислового виробництва кальцій і магній містяться зазвичай у вигляді карбонатів (вапнякове і доломітове, борошно, туф, гаж), силікатів і оксидів (частково в складі цементного пилу і сланцевої золи). Ці

меліоранти мають різні хімічний склад, щільність і пористість, тому швидкість їх розчинення і тривалість дії на ґрунт різна.

Якість вапнувального матеріалу оцінюють не лише за вмістом сполук, які нейтралізують кислотність ґрунту, а й за тониною (тонкістю) помелу. Чим тонший помел добрива, тим швидше і повніше воно взаємодіє з ґрунтом та швидше нейтралізує кислотність ґрунту. Кожна часточка вапна діє на ґрунт у радіусі 2 мм, тому збільшення кількості часточок подрібненням і ліпший їх просторовий розподіл у ґрунті підвищує рівень реакції вапнувального матеріалу.

Тверді карбонатні породи залежно від вмісту кальцію і магнію називають *вапняками* (50—55 % CaO і до 1 % MgO), *доломітованими вапняками* (40—55 % CaO і до 9 % MgO) та *доломітами* (25—32 % CaO і до 14—20 % MgO). За вмісту до 5 % домішок (глина, пісок та ін.) породу називають чистою.

Найм'якішою із твердих порід є крейда (CaCO_3), яка містить до 55 % CaO і до 0,6 % MgO . Це осадова тонкозерниста гірська порода білого кольору. Складається в основному з карбонату кальцію з незначною домішкою піску та глини. Вона легко розмелюється, тому трохи ефективніша порівняно із вапняком, особливо у перший рік внесення.

Вапняне борошно отримують розмелюванням вапняків. У воді воно важкорозчинне, тому ефективність його значно залежить від тонини помелу. Вапняне борошно має містити карбонатів кальцію і магнію в перерахунку на CaCO_3 не менш як 85 %; вологість - не менш як 2 %; вміст часточок розміром 0,25 мм — не менш як 60 %; понад 1 мм - не більш як 10 %. За дією на властивості ґрунту і врожай сільськогосподарських культур на ґрунтах, добре забезпечених магнієм, воно наближається до доломітового борошна.

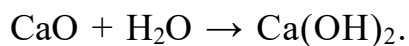
Доломітове борошно отримують розмелюванням доломіту (суміш CaCO_3 +

+ MgCO_3 з CaO + MgO), який має містити карбонатів кальцію і магнію в пере-рахунку на CaCO_3 — 80-110 %. Сірого або темно сірого кольору, належать до твердих вапнякових матеріалів. Якщо в карбонатній породі мінералу доломіту міститься 50—90 %, то її називають *вапнистим доломітом*, за меншого вмісту доломіту — *доломітизованим вапняком*. Меліоративна дія висока. Особливо ефективно доломітове борошно на бідних на магній піщаних і супіщаних ґрунтах. При внесенні повної норми доломітового борошна негативний вплив вапнування на картоплю і льон відсутній або значно менший, ніж при внесенні повної норми інших вапняних меліорантів.

Відходи промисловості за обсягами застосування займають значну частку серед вапняних добрив і за ефективністю не поступаються вапняному борошну, оскільки до їх складу в значній кількості входять органічні речовини, фосфор, сірка, різні мікроелементи. Проте деякі з відходів містять домішки, що негативно впливають на розвиток рослин, зокрема на початку росту. Це слід враховувати при застосуванні їх для вапнування ґрунтів, особливо у високих нормах.

Палене і гашене вапно. У результаті випалювання твердих вапняних порід добувають палене вапно, основою якого є оксиди кальцію і магнію.

За тривалого відкритого зберігання палене вапно взаємодіє з вологою й утворює гідроксид - гашене вапно:



Гашене вапно як відхід виробництва отримують на вапняних заводах та під час виробництва хлорного вапна. За нейтралізуючою здатністю 1 т гашеного вапна еквівалентна 1,35 т CaCO_3 .

Розчинність гашеного вапна Ca(OH)_2 у 100 разів більша, ніж CaCO_3 , тому це швидкодійне вапняне добриво найліпше використовувати для вапнування глинистих і важкосуглинкових ґрунтів. Вносять його за два тижні до сівби

сільськогосподарських культур. Унаслідок швидшого вимивання кальцію післядія гашеного вапна менша, ніж вапняного борошна.

Дефекат — відходи цукрових заводів після перероблення коренеплодів буряку цукрового. Порошок сірого кольору, розсипчастий, розчинність у воді менша ніж гіпсу, але більш як крейди. Сухий дефекат вологістю не більше ніж 20 % містить 60-75 CaCO_3 , 10—15 — органічних речовин, 0,2-0,7 — N, 0,2—0,9

— P_2O_5 , 0,3—1,0 % K_2O та інші елементи живлення. Тому за ефективністю для всіх культур дефекат значно переважає вапняне борошно. Дефекат ефективний на ґрунтах з гідролітичною кислотністю не менш як 2 смоль/кг ґрунту.

Серед відходів промислових підприємств для вапнування кислих ґрунтів також можна використовувати перелічені нижче.

Металургійні шлаки — мартенівські, доменні й електроплавильні крім кальцію містять магній, сірку, фосфор, манган та інші елементи живлення, тому вони ефективніші, ніж вапняне борошно.

Цементний пил — відходи цементних заводів. Порошок темно-сірого або сірого кольору, який вловлюється електрофільтрами в процесі виготовлення цементу. Дуже пилить. Містить 45-48 % CaO і 10—15 % K_2O . Кальцій міститься у формі оксиду, гіпсу, калій — у формі карбонатів, гідрокарбонатів, сульфатів і силікатів.

Флотаційні відходи - відходи промислового добування сірки. Містять близько 80

% CaCO_3 і 8—12 % сірки, тому ефективні на бідних на сірку ґрунтах.

Зола сланців утворюється під час факельного спалювання розмелених горючих сланців на електростанціях.

Зола кам'яного вугілля утворюється під час спалювання вугілля на теплових електростанціях.

Зола торфу утворюється в результаті використання торфу на паливо. Нейтралізуюча здатність 30—35 %. Часто застосовують як калійне добриво під картоплю та інші культури, які негативно реагують на вміст у добриві хлору.

Доломітовий пил утворюється в процесі випалювання доломітів. Нейтралізуюча здатність в 1,5 раза вища, ніж карбонату кальцію.

Дунітове борошно — залишок після збагачення платинової руди. Містить 40-50 % MgO.

Газове вапно утворюється на газових заводах. Нейтралізуюча здатність до 70%.

Содове вапно $\text{CaCO}_3 + \text{CaCl}_2$ - відходи содових заводів. Порошок білого кольору, містить до 50 % CaO і MgO. Після висушування розсипчастий, не потребує додаткового подрібнення.

Підзол — відходи шкіряного виробництва. Нейтралізуюча здатність до 60%.

Відходи целюлозно-паперового виробництва — містять до 50 % CaO і MgO.

Карбідне вапно - відходи виробництва ацетилену з карбіду кальцію. Нейтралізуюча здатність 140 %.

Місцеві вапняні добрива - пухкі (м'які) карбонатні породи, які не потребують розмелювання. Вони швидше діють, тому ефективніші за мелені вапняки. До них належать вапняні туфи, гажа, мергелі, торфотуфи, природне-доломітове борошно.

Вапняний туф (джерельне вапно) — пухка, добре розсипчаста порода сірого кольору, що містить 70-90 % CaCO з органічними і мінеральними домішками. Трапляється у знижених елементах рельєфу — долинах, балках, ярах у місцях виходу на поверхню джерел. Перед внесенням туфу породу просіюють, а великі грудки подрібнюють.

Гажга (озерне вапно) утворюється після висихання озер, що заповнювалися багатими на карбонати водами, або після очищення дна існуючих водойм. При вивезенні на поля потребує підсушування або проморожування, після чого легко розсипається на дрібні часточки (<0,25 мм). Часто ефективніше за вапняне борошно.

Мергель - містить 25-50 % CaCO_3 , до 2 – MgCO_3 та 25 % домішок глини, піску та ін. Тонкозерниста, землиста, щільна або сланцювата осадова гірська порода. Колір сірий, зеленкуватий, жовтий або бурий. Після провітрювання, висихання та промерзання стає розсипчастим і добре розтирається в порошок. Щільний мергель доцільно вивозити на поля взимку для проморожування, що сприяє його подрібненню. За ефективністю не поступається вапняному борошну.

Торфотуфи (торфогажа, карбонатизований торф) — багаті на вапно (містять 10-20, іноді 50 % CaCO_3) низинні торфи. Добриво-меліорант, найбільш придатне для бідних на органічні речовини ґрунтів, які знаходяться неподалік від місця його покладів.

Природне доломітове борошно пухка вапняно-борошниста маса із вмістом близько 80 % карбонатів кальцію і магнію. За впливом на властивості ґрунту і продуктивність сільськогосподарських культур, особливо на слабозабезпечених магнієм ґрунтах, наближається до доломітового борошна, але енерговитрати на його виробництво на 40 % нижчі порівняно з доломітовим борошном. Це добриво має також деякі екологічні переваги — знижується запиленість повітря та втрати кальцію і магнію від вимивання. Тому його можна вносити відцентровими розкидачами мінеральних добрив. Вміст магнію робить це вапняне добриво ціннішим для застосування на легких за гранулометричним складом ґрунтах при вирощуванні картоплі, коренеплодів, льону і багаторічних трав.

Лесові та лесоподібні карбонатні породи з вмістом СаО від 10 до 30 % — нашаровані пористі (48-50 %) карбонатні осадові породи сіро-жовтого чи палевого кольору. Ефективні на кислих ґрунтах легкого гранулометричного складу.

Фосфорити $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ - сірий або бурий порошок різних відтінків, не злежується. За вмістом P_2O_5 , розрізняють багаті фосфорити (понад 24 %), середньої якості (18-24 %) та бідні (5-18 %). В Україні є шість основних фосфоритоносних районів: Придніпровський, Харківсько-Донецький, Чернігівський, Сумський, Закарпатський і Кримський.

Кальцій також входить до складу деяких фосфорних та азотних добрив. Зокрема суперфосфат гранульований містить близько 20 % Са (1/3 водорозчинного і 2/3 нерозчинного і важкодоступного для рослин). Найліпшими кальцієвими добривами вважають кальцієву і вапняково-аміачну селітри.

7.5. Засолення, солонцюватість та потреба у хімічній меліорації

Хімічна меліорація солонцевих ґрунтів

Залежно від генезису і властивостей різних видів солонцевих ґрунтів здійснюють диференційований комплекс заходів з підвищення їх родючості. Доцільність меліорації, її вид, технологія визначаються агрокліматичними ресурсами, еколого-меліоративним станом ґрунтів, потребами й ресурсозабезпеченням аграрного виробництва. З урахуванням цього виділяють п'ять меліоративно-технологічних груп солонцевих ґрунтів.

1 група — солонцеві ґрунти, які нині за умов дефіциту, ресурсозабезпечення не потребують докорінної витратної меліорації. Їх родючість підвищують внесенням підвищених норм органічних і мінеральних добрив, запровадженням травосіяння та солестійких культур. До цієї групи

належать чорноземи і темно-каштанові слабосолонцюваті ґрунти з плямами солонців до 10%, а також раніше плантажовані солонцеві ґрунти.

II група — солонцеві ґрунти, що потребують хімічної меліорації. Це чорноземи і каштанові солонцюваті ґрунти з питомою часткою солонців відповідно 10—30 і 30—50 %, зрошувані обмежено придатними водами повторно осолонцьовані ґрунти.

III група - солонцеві ґрунти, придатні для меліоративної плантажної оранки. До цієї групи належать темнокаштанові і каштанові солонцюваті ґрунти, з неглибоким (до 40—50 см) заляганням карбонатів і (або) гіпсу.

IV група, — солонцеві ґрунти. Обмежено придатні для сільськогосподарського використання. Вони потребують поліпшення безвідвальним обробітком, хімічною та фітомеліорацією. До них належать лучно-чорноземні й лучно-каштанові солонцюваті ґрунти та їх комплекси із солонцями (25—50 %).

V група — солонцеві ґрунти, непридатні для меліорації й обробітку. До цієї групи входять лучно-чорноземні й лучно-каштанові солонцюваті ґрунти, та їх комплекси з лучними солонцями (понад 50 %). Якщо вони були розорані, їх необхідно вивести з обробітку, для створення культурних сіножатей і пасовищ.

Метод хімічної меліорації, передбачає внесення у солонцеві ґрунти кальцієвмісних речовин (гіпс, фосфогіпс, крейда, вапно, хлорид кальцію), кислот чи кислих форм меліорантів (сульфати заліза й алюмінію, пірит). Серед прийомів хімічної меліорації найпоширенішим є гіпсування.

Гіпсування — внесення гіпсу з метою хімічної меліорації солонцюватих і солончакуватих ґрунтів, які мають велику частку натрію в ГВК і лужну реакцію, що й зумовлює несприятливі фізичні, хімічні, фізикохімічні та біологічні, властивості й низьку родючість ґрунту.

Теоретичною основою гіпсування є концепція К. К. Гедройца про провідну роль обмінного натрію в солонцевому процесі ґрунтоутворення. Дія гіпсу виявляється в тому, що внесений кальцій витісняє обмінний натрій з ГВК, створюючи переважання іонів кальцію в ґрунтовому розчині, внаслідок чого зменшується рухливість ґрунтових колоїдів (гумусу, глини та ін.), нейтралізується лужність і створюються умови для окультурення ґрунту.

Гіпс ефективно діє лише в тому разі, коли підґрунтові води лежать глибше за 1,2—1,5 м, інакше продукти обмінних реакцій (зокрема сульфат натрію) не виносяться вниз по ґрунтовому профілю й розсолювання не відбувається.

Лужна реакція ґрунту несприятлива для вирощування більшості сільськогосподарських культур, знижує доступність для рослин фосфору, заліза, мангану й бору. Основною причиною загибелі рослин на засолених ґрунтах є високий осмотичний тиск ґрунтового розчину, який перевищує тиск їх клітинного соку, внаслідок чого зменшується надходження води в окремі тканини, збільшується транспірація, погіршуються асиміляція, дихання та утворення цукрів, що призводить до висихання й загибелі рослин.

Потреба у хімічній меліорації солончакуватих ґрунтів зростає (від слабкої до середньої і сильної) зі збільшенням частки натрію в ГВК з 5 до 20 %. Тому гіпсування більше потребують солончакуваті ґрунти (містять 10—20 % іонів Na^+) і солонці (містять більш як 20 % іонів у ГВК).

Властивості слабкосолонцюватих ґрунтів поліпшують за допомогою землювання і фітомеліорації.

Землювання — це засипання солонцюватих плям родючим (зазвичай чорноземом) шаром ґрунту 15—20 см.

Фітомеліорація – раціональний добір культур та оптимальних технологій їх вирощування. Частка пару та інших культур у сівозміні (люцерна,

буркун, багаторічні злакові трави тощо) мають сприяти розсоленню і розсолонцюванню із застосуванням інших видів меліорації (гіпсування, кислування, землювання; самогіпсування). Наприклад, конюшина і люцерна, мають глибоку кореневу систему, тому кальцій переміщується з глибоких шарів ґрунту (материнської породи) й накопичується в орному шарі. Він витісняє з ГВК натрій, що сприяє розсоленню ґрунту, а його лужна реакція зміщується в бік нейтральної.

У контексті проведення земельної реформи в районах поширення солонцевих ґрунтів передбачено виведення з ріллі сильносолонцюватих ґрунтіві солонцевих комплексів, де плями солонців займають 50 % і більше, для запровадження на них культурних сіножатей і пасовищ. Для їх створення залучають адаптовані до ґрунтових умов соле- та солонцестійкі культури (гірчиця, ячмінь, сорго, просо, суданська трава). У посушливих районах Степу, де під солонцевим горизонтом на глибині 30—50 см залягають багаті на гіпс і карбонати кальцію шари ґрунту, гіпсування здійснюють за методом **самогіпсування**. Для цього проводять плантажну оранку на глибину 50—60 см (залежно від глибини залягання гіпсоносного шару ґрунту). Багатий на кальцій шар ґрунту під час оранки виноситься на поверхню і переміщується із солонцевим горизонтом. Глауберова сіль $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$, що утворюється внаслідок взаємодії кальцію гіпсу з ГВК, поступово вимивається у нижні шари ґрунту, а кислотність ґрунтового розчину зміщується у бік нейтральної. Плантажна оранка солонців також сприяє руйнуванню досить щільного водонепроникного мулуватого горизонту, в якому гальмуються всі мулуватопилуваті часточки, що переважно розміщені на глибині 18—20 см. Крім того, поліпшуються фізичні, фізико-хімічні властивості і водний режим солонців, створюються сприятливі умови для збагачення ґрунту рухомими формами

елементів живлення та для вимивання легкорозчинних солей. Післядія плантажної оранки виявляється впродовж 50 років.

Меліоративну плантажну оранку не рекомендується проводити на солонцях солончакових і солончаках приморських, на солонцях лучно-каштанових оглеєних і солонцях оглеєних, на солонцевих ґрунтах, що мають глибину скипання карбонатів нижчу за 55 см, на ґрунтах з карбонатними ґрунтоутворювальними породами нелесового генезису (мергелізованими й червоно-бурими глинами, вапняками, морськими третинними глинами та ін.), на мочаристих солонцевих ґрунтах.

Норми гіпсу визначають за еквівалентною кількістю натрію в ГВК, який має бути замінений на кальцій. Різниця між загальною кількістю обмінного натрію і безпечною його кількістю в ґрунті (зазвичай 5—10 % ємності катіонного обміну) становить кількість натрію, яку потрібно замінити на кальцій. Для заміщення 1 г натрію за еквівалентною масою потрібно $0,086 \text{ г CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Виходячи з цього, норму гіпсу H (т/га) розраховують за такою формулою:

$$H = 0,086(\text{Na} - \text{KT}) \text{hd},$$

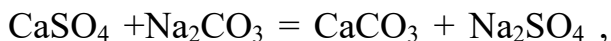
де 0,086 - 1 смоль $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, г; Na - вміст натрію у ґрунті, смоль/кг; K - частка допустимого вмісту натрію в ємності катіонного обміну ґрунту (0,05 - 0,10), за якої гіпсування не проводять; T — ємність катіонного обміну, смоль/кг ґрунту; h — товщина меліорованого шару ґрунту, см; d — об'ємна маса меліорованого шару ґрунту, г/см³.

Для підвищення економічної ефективності хімічної меліорації вчені ННЦ

«Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім.О.Н.Соколовського» рекомендують вносити кальцієвмісні меліоранти на солонцях Лісостепу в нормі 8

- 10 т/га, лучно-чорноземних солонцюватих ґрунтах — 3-4, на солонцюватих ґрунтах Степу — 4-6 т/га.

Гіпс, потрапивши в ґрунт, знешкоджує в ґрунтовому розчині соду, шкідливу для розвитку рослин:



а кальцій поступово витісняє натрій із ГВК: $\text{Na}^+[\text{ГВК}] + \text{CaSO}_4 \rightarrow [\text{ГВК}] \text{Ca}^{2+} + \text{Na}_2\text{SO}_4$. Na^+

Сульфат натрію, що утворюється, є нейтральною сіллю. У невеликих кількостях він нешкідливий для рослин, але при гіпсуванні солонців, де вміст натрію в ГВК понад 20 %, його потрібно видаляти вимиванням із кореневмісного шару ґрунту.

Взаємодіючи з ґрунтом, гіпс одночасно діє на рослини, оскільки є додатковим джерелом кальцію та сірки і може бути ефективним добривом на будь-яких (а не лише на лужних) ґрунтах.

Для гіпсування ґрунтів використовують гіпс та інші відходи хімічної промисловості.

Гіпс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) — безбарвний і прозорий, а за наявності домішок має забарвлення від сірого до бурого. Містить 71-73 % CaSO_4 .

Фосфогіпс — побічний продукт виробництва фосфорних добрив — суперфосфату подвійного і преципітату. Містить 70—75 % CaSO_4 і 2—4 % P_2O_5 тому ефективніший, ніж гіпс при внесенні в еквівалентних нормах.

Глиногіпс - природні поклади пухкої породи, що не погребує розмелювання. Містить 60 - 90 % CaSO_4 .

Нині як меліоранти використовують хлорид кальцію, сірку, сульфат заліза, сульфат алюмінію, дефекату неорганічні кислоти (сірчану, соляну, азотну) тощо. Вибір меліоранта визначається ефективністю його впливу на ґрунт та відповідною властивістю ґрунту.

Якщо замість гіпсу застосовують інший меліорант, то при визначенні його норми, враховують вміст меліоруючих речовин, еквівалентний 1 т гіпсу. Для цього використовують коефіцієнти перерахунку цих речовин на гіпс: гіпс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) — 1,0; хлорид кальцію ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) — 0,85; сірка (S) — 0,19; сірчана кислота (H_2SO_4) — 0,57; сульфат заліза ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) — 1,62; сульфат алюмінію ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) — 1,29; полісульфід кальцію (CaS_5) — 0,77; вапняк (CaCO_3) — 0,58; глиногіпс (60 % $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) — 1,67.

Ефективність гіпсування солонців у лісостеповій зоні досить висока. Після одноразового внесення гіпсу в нормі 10 т/га приріст урожаю зерна колосових культур щорічно впродовж 7—8 років становить 0,5 т/га, однорічних трав — 2,5, а багаторічних — 3,5 т/га. В середньому за 8 - 10 років у степовій зоні він дещо нижчий — 0,3—0,4 т/га.

Плантажна оранка забезпечує середньорічний приріст урожаю зернових культур у межах 0,4-1,0 т/га.

У богарних (незрошуваних) умовах меліорант повільніше взаємодіє з ґрунтом, тому його дія триваліша, а повний ефект досягається лише на 4—5-й рік. Отже, для підвищення ефективності гіпсування потрібно сприяти збільшенню вологозабезпеченості ґрунту.

Ефективність гіпсування ґрунтів зростає за поєднаного внесення органічних і мінеральних добрив. Серед мінеральних добрив у цьому разі ефективніші фізіологічно та гідролітично кислі форми.

Зміна агрохімічних і фізичних властивостей солончакуватих ґрунтів відбувається доволі повільно, але зберігається тривалий час. Тому повторну меліорацію за потреби проводять не раніше, ніж через 10 років.

ЛЕКЦІЯ 10. Smart технології та AI в меліорації

Вступ до цифрової меліорації та концептуальні основи

Сучасна меліорація ґрунтів переживає трансформаційний період, переходячи від традиційного фокусу на великомасштабних інженерних та гідротехнічних спорудах (дренаж, зрошувальні канали) до інтелектуального управління ґрунтовими ресурсами на рівні мікрозони. Ця еволюція стала можливою завдяки швидкому впровадженню технологій точного землеробства (Precision Agriculture Technologies, PATs).¹

Технології PATs, включаючи GPS, Інтернет Речей (IoT), безпілотні апарати (БПЛА) та просунутий аналіз даних, відіграють вирішальну роль у підвищенні продуктивності та ефективності аграрного сектору. Для магістерської програми, орієнтованої на «Охорону та технології відновлення ґрунтів», ключове значення має те, що ці технології також забезпечують екологічну стійкість та довгострокове здоров'я довкілля, мінімізуючи нецільове використання ресурсів.¹

10.2. Визначення та роль Smart-технологій у підвищенні стійкості ґрунтів

Smart-меліорація визначається як використання автоматизованих систем та штучного інтелекту (AI) для формування систем підтримки рішень (Decision Support Systems, DSS), які оптимізують водний, сольовий та поживний режими ґрунту в динамічному режимі.

Фундаментальні компоненти Smart-систем включають:

- **Машинне навчання (ML) та Глибоке навчання (DL):** Ці методи використовуються для складного прогностичного моделювання, що охоплює прогнозування врожайності, оцінку поточного та майбутнього стану ґрунту, а також діагностику проблем.²

- **Інтернет Речей (IoT):** Забезпечує безперервний збір польових даних у реальному часі з різних сенсорів.²
- **Системи підтримки рішень (DSS):** Перетворюють оброблені та проаналізовані дані на конкретні, автоматизовані або рекомендовані дії (наприклад, зміна норми поливу або внесення добрив).²

Інтеграція AI змінює саму парадигму меліоративної діяльності. Якщо традиційні підходи є переважно *реактивними* (тобто відновлення або ремонт після виявлення деградації, наприклад, ремонт дренажної системи після вторинного засолення), то сучасні AI-системи є *проактивними* та *прогностичними*. Наприклад, використання мереж довгої короткочасної пам'яті (**LSTM**) дозволяє моделювати динаміку вологості або солоності ґрунту на значний період вперед. Це дає можливість застосовувати профілактичні меліоративні заходи (коригування режиму поливу, промивка) ще до того, як рівень деградації стане критичним, що є ключовою перевагою DL для підвищення стійкості ґрунтових систем.²

Розділ 2: Технологічний Базис: Інтернет Речей (IoT) та Сенсорні Мережі

2.1. Класифікація інтелектуальних сенсорів для ґрунтової меліорації

Функціонування будь-якої Smart-системи у меліорації цілком залежить від здатності високоточних сенсорів збирати вичерпну інформацію про фізико-хімічні та морфологічні параметри ґрунту.³

Ключові сенсорні розробки та системи (2018–2025):

1. **Моніторинг Вологості та Водного Потенціалу:** Основою для Smart-зрошення є датчики вологості. Зокрема, використовують датчики **Watermark** та автоматичні тензіометри, які дозволяють контролювати вологість на кількох глибинах ґрунтового профілю.⁵ Компанія **CropX** розробила датчики другого

покоління, які аналізують стан ґрунту в конкретній зоні та передають дані через інтернет для автоматизованого внесення води, що демонструє рух до повністю автоматизованих систем іригації.⁴

2. **Комплексний Фізико-Хімічний Моніторинг:** Системи, як-от **Libelium Smart Agriculture Xtreme**, являють собою комплексні сенсорні вузли, що включають до 19 датчиків. Ці системи вимірюють не лише вологість, але й електроопір ґрунту (який корелює з електропровідністю та солоністю), водний потенціал та рівень кисню. Вимірювання електроопору та кисню є критично важливими для агронома-меліоратора, оскільки дозволяють оцінити ефективність дренажу та аераційний режим ґрунту, а також визначити необхідну кількість добрив.⁴

3. **Дистанційне Зондування та Діагностика Стресу: Sentera sensors**, включаючи модель Double 4K, сумісні з БПЛА, призначені для визначення індексів вегетації рослин (наприклад, NDVI, NDRE, NIR).⁴ Ці індекси є непрямыми, але ефективними показниками водного дефіциту, сольового стресу або поживних проблем, які є прямим наслідком неоптимального меліоративного режиму.

Важливим структурним елементом є взаємозалежність між фізичним станом ґрунту та надійністю даних, зібраних сенсорами. Дослідження показують, що в умовах, де меліоративні заходи (такі як зміна текстури або покращення дренажу) були успішно реалізовані, ґрунтова суміш із поліпшеними дренажними властивостями забезпечує **стабільніші та надійніші дані** від сенсорів.⁷ Якщо ґрунт має погану структуру чи високу неоднорідність, показання вологості можуть бути неточними або занадто мінливими, що робить прийняття рішень AI менш ефективним. Таким чином, Smart-технології досягають своєї максимальної ефективності лише за умови, що інженерна (фізична) меліорація ділянки була виконана якісно.

2.2. Архітектура IoT-систем для польового моніторингу

Системи Smart-меліорації функціонують на основі багат шарової архітектури, яка забезпечує збір, обробку та передачу даних для прийняття рішень.⁸

Основні рівні архітектури:

1. **Сенсорний Рівень (Sensor Layer):** Збір сирих даних (волога, температура, ЕС, освітленість). Для цього використовуються інтегровані датчики.⁹

2. **Рівень Периферійної Обробки (Edge Processing Layer):** Мікроконтролери (наприклад, ESP32 або ESP8266) виконують початкову обробку даних. Цей рівень є критичним, оскільки він може виконувати базові алгоритми машинного навчання (наприклад, **Random Forest**) для автоматизованого прийняття рішення про зрошення без затримки, спричиненої передачею в хмару.⁸

3. **Комунікаційний Рівень (Communication Layer):** Відповідає за надійну та безпечну передачу даних на віддалений сервер. Використовуються енергоефективні протоколи, такі як **MQTT** (Message Queuing Telemetry Transport), а також технології **LoRa** (для великих відстаней і низького енергоспоживання) або мобільний інтернет (GSM) для польових мереж.⁵

4. **Рівень Користувачького Інтерфейсу та Хмарної Обробки (User Interface Layer):** Хмарні платформи (наприклад, AWS IoT Core) забезпечують сховище даних, візуалізацію, виконання складних AI-моделей та віддалене керування виконавчими механізмами (насосами, клапанами) через мобільні додатки.⁸

Нижче представлена систематизація ключових Smart-компонентів, розроблених у період 2018–2025 років:

Таблиця 1: Огляд Smart-Сенсорів та IoT Компонентів для Моніторингу Ґрунтів (2018–2025)

Сенсор/Система	Вимірюваний Параметр	Використання в Меліорації	Джерело
Watermark / Автоматичні тензіометри	Вологість ґрунту / Водний потенціал	Управління краплинним та дощувальним зрошенням, моніторинг на 2–3 глибинах	5
Libelium Smart Agriculture Xtreme	Електроопір (солоність), Рівень кисню, Водний потенціал	Визначення потреби у добривах, Оцінка дренажу та аерації ґрунту	4
Sentera Double 4K (БПЛА + Камера)	Індекси вегетації (NDVI, NDRE, NIR)	Оцінка ефективності зрошення та впливу водного чи сольового стресу на культуру	4
Random Forest Algorithm	Дані сенсорів	Автоматизоване прийняття рішення про зрошення (Edge Processing)	9
LoRaWAN / GSM мережі	Дані моніторингу	Надійна та енергоєфективна передача даних на	5

		великі відстані у польових умовах	
--	--	--------------------------------------	--

Розділ 3: AI та Машинне Навчання (ML) як Інструменти Прогнозування у Меліорації

3.1. Застосування ML для оцінки та моделювання ґрунтових параметрів

Штучний інтелект та машинне навчання є незамінними для сучасної меліорації, оскільки вони дозволяють обробляти гетерогенні та великомасштабні масиви даних (клімат, сенсори, супутники) для виявлення складних нелінійних залежностей.

У галузі ґрунтової інженерії та геотехнічної меліорації AI використовується для обробки даних моніторингу ділянок, що є критичним при проектуванні дренажних систем та укріплень. AI-алгоритми інтегрують мульти-джерельні дані для більш надійної характеристики ґрунтових параметрів та прогнозування деформацій, що забезпечує ефективніше інженерне проектування.¹⁰ Також просуваються роботи у сфері використання AI для просторово-часового аналізу консолідації ґрунтів під час швидкої меліорації, про що свідчать дослідження Шуку та Фоона (Shuku T., Phoon K. K.) у 2023 році.¹⁰

Для вирішення проблеми засолення ґрунтів, польові вимірювання якого є дорогими та часозатратними, ML-алгоритми забезпечують масштабованість. Класичні методи, такі як **Support Vector Machine (SVM)** та **Random Forest (RF)**,

ефективно інтегрують дані дистанційного зондування (мультиспектральні знімки Sentinel-2) з обмеженою кількістю польових вимірювань.¹¹ Дослідження підтверджують, що підвищення кількості тренувальних зразків у цих моделях може значно підвищити точність карт солоності, в деяких випадках покращуючи результати до 700% при переході від малої до розширеної бази даних.¹²

3.2. Deep Learning (DL) у діагностиці та управлінні

Глибоке навчання використовує складні нейронні мережі для вирішення завдань, які виходять за рамки можливостей класичних ML-моделей:

- **Convolutional Neural Networks (CNNs):** Ці мережі використовуються для аналізу зображень і дозволяють здійснювати раннє виявлення хвороб та стресу рослин. Оскільки значна частина стресу (наприклад, хлороз або затримка росту) може бути прямо чи опосередковано спричинена порушеннями водного режиму або накопиченням солей у ґрунті, CNNs стають важливим інструментом діагностики ефективності меліорації.²
- **Long Short-Term Memory (LSTM):** Мережі LSTM, спеціально розроблені для обробки та прогнозування часових рядів, є необхідними для оцінки динаміки здоров'я ґрунту та водного режиму, а також для точного прогнозування врожайності.²

Застосування AI-моделей дозволяє виявити неінтуїтивні, але критично важливі змінні, що керують процесами деградації ґрунтів. Наприклад, дослідження засолення ґрунтів у пустельних районах із застосуванням ML-системи показало, що ключовими предикторами є не тільки вологість ґрунту (яка пояснює 71.33% варіативності), але й **концентрація підземного CO₂** (13.83%).¹³ Це відкриття

вказує на те, що динаміка засолення є результатом складних геохімічних процесів, пов'язаних з утворенням солей та карбонатів, а не лише прямим гідрологічним фактором. Здатність AI ідентифікувати такі приховані залежності вимагає переосмислення традиційних меліоративних моделей, які зазвичай базуються на спрощених рівняннях дифузії солей та мінералізації зрошувальної води.¹⁴

Таблиця 2: Застосування AI/ML Алгоритмів у Ключових Меліоративних Викликах

Меліоративний Виклик	Завдання	Рекомендований AI/ML Алгоритм	Автори та Рік (Приклад)
Оптимізація зрошення	Прогнозування потреби у воді на основі фізіології рослин та ґрунту	LSTM, Комплексні AI-алгоритми	Du W., Khan S., Carpin S., 2023/2025 ¹⁵
Картографування засолення	Високоточне визначення класів солоності ґрунту (на основі Sentinel-2)	RF (Random Forest), SVM (Support Vector Machine)	Ghassemian et al., 2021 ¹¹
Діагностика ґрунтового стресу	Раннє виявлення хвороб, пов'язаних	CNN (Convolutional Neural Networks)	Arjun et al., 2024 ²

	з порушенням водного режиму		
Геотехнічна меліорація	Прогнозування деформацій та надійності інженерних систем	AI/ML інтеграція мульти-джерельних даних	Shuku T., Phoon K.K., 2023 ¹⁰

4: Smart-Зрошення та Оптимізація Водного Режиму Ґрунтів

Smart-зрошення є найбільш практично розвиненою сферою застосування AI у меліорації. Воно не лише оптимізує водний баланс, але й є первинним інструментом запобігання вторинному засоленню.

AI-Driven Decision Support Systems (DSS) у керуванні поливом

Інтелектуальні системи зрошення значно перевершують прості системи, що лише реагують на поріг вологості. Сучасні AI-системи інтегрують кліматичні дані, тип ґрунту, стадію розвитку культури і, що особливо важливо, фізіологічний водний стрес рослини.⁷

Механізми роботи адаптивного зрошення:

- Багатофакторний Збір Даних:** Система використовує сенсори для вимірювання вмісту вологи у ґрунті. Ключовим моментом є також вимірювання **потенціалу руху води через рослину** та рівень транспірації (випаровування води через листя). Це дозволяє визначити фактичний фізіологічний водний попит культури, а не лише наявність води в ґрунті.¹⁵

2. **Моделювання Ґрунту:** Для забезпечення точності AI-рішень експерт із ґрунтознавства (наприклад, Safeeq Khan у Каліфорнійському кейсі) створює точну фізичну та гідрологічну модель ґрунту ділянки, яка слугує основою для алгоритмічної обробки.¹⁵
3. **Алгоритмічна Оптимізація:** Спеціалізований AI-алгоритм (розроблений, наприклад, Stefano Carpin) обробляє всі зібрані дані в реальному часі, визначаючи не лише необхідність поливу, але й його точну тривалість та об'єм. Цей алгоритм керує системою.¹⁵
4. **Виконання та Контроль:** Через IoT-мережу система віддає команду на відкриття індивідуальних спринклерів, що забезпечує ультра-точне дозування води.¹⁵

4.2. Кейс-стаді (Світ): AI-керована система зрошення мигдалевого саду (Каліфорнія, США)

Одним з найбільш показових прикладів інтеграції AI в меліорацію є проект, профінансований Fall 2023 Climate Action Seed Funds, який реалізується дослідниками з UC Merced та University of California Agriculture and Natural Resources.¹⁵

- **Автори:** Професор Wan Du (керівник проекту), Професор Safeeq Khan (експерт з ґрунтознавства та водних ресурсів), Професор Stefano Carpin (розробник моделі III).¹⁵
- **Мета:** Дослідження та демонстрація можливості заощадити максимальну кількість води, зменшити експлуатаційні витрати для фермерів та зберегти природні ресурси шляхом порівняння AI-системи з традиційними методами зрошення.¹⁵

- **Механізм:** Система встановлена в мигдалевому саду в Парльє і є інноваційною тим, що AI-алгоритм керує поливом, враховуючи не лише вологість ґрунту, але й фізіологічний водний потік (рух води через дерево і випаровування через листя).¹⁵

Цей підхід перетворює Smart-зрошення на критичний інструмент **кліматичної стійкості** (Climate Resilient Agriculture). В умовах глобального дефіциту водних ресурсів, AI-системи забезпечують не просто "достатній" полив, а "мінімально необхідний" для максимізації врожаю. Це має пряме економічне значення, оскільки оптимізує такі показники, як водомісткість виробництва (витрата води на одиницю продукції) та водовіддача ¹⁶, і водночас сприяє збереженню природних ресурсів для майбутніх поколінь.¹

Розділ 5: AI у Боротьбі із Засоленням та Деградацією Ґрунтів

Засолення ґрунтів є складним меліоративним викликом, який AI допомагає вирішувати на етапах діагностики, прогнозування та оптимізації ремедіаційних заходів.

5.1. Дистанційне зондування та ML для великомасштабного картографування засолення

Через високу вартість та часові витрати, пов'язані з польовими вимірюваннями електропровідності (EC) на великих площах, AI та ML забезпечують необхідну масштабованість. Застосовуються ML-моделі (RF, SVM), які інтегрують

мультиспектральні дані супутників (наприклад, Sentinel-2), що корелюють з індексами, пов'язаними зі станом ґрунту та стресом рослин, для створення високоточних карт солоності. Застосування цих технологій дозволяє агрономам-меліораторам отримувати надійну інформацію про адаптивну здатність ферм та вчасно пропонувати заходи боротьби з явищем.¹¹

5.2. Предиктивне моделювання динаміки засолення

Прогнозування динаміки засолення є життєво необхідним для довгострокового планування. Традиційні теоретичні моделі описують засолення, ґрунтуючись переважно на кількості мінеральних солей у зрошувальній воді та їхньому впливі на продуктивність рослин.¹⁴

Проте, AI-доповнені моделі, включаючи LSTM, здатні інтегрувати значно ширший спектр даних: рівень ґрунтових вод, інтенсивність випаровування, а також складні геохімічні предиктори, виявлені ML, як-от концентрація підземного CO₂.¹³ Така інтеграція дозволяє створювати більш точні прогнози ризику вторинного засолення та планувати профілактичні промивки чи дренажні заходи заздалегідь.

5.3. Smart-підходи до ремедіації забруднених ґрунтів

Відновлення (ремедіація) забруднених ґрунтів також активно використовує інноваційні технології, оптимізація яких вимагає залучення AI. Сучасні методи включають біологічні (біоаугментація, фіторемедіація), хімічні (просунуті процеси

окислення, використання наночастинок) та навіть генетичні маніпуляції для підвищення ферментної активності мікроорганізмів.¹⁸

Роль AI у ремедіації полягає у моделюванні кінетики складних хімічних реакцій (наприклад, процесів, пов'язаних з видаленням вугільної смоли чи фтору) та оптимізації дозування реагентів.¹⁹ AI-системи також можуть допомогти у виборі найбільш ефективних штамів мікроорганізмів для біоаугментації, виходячи з конкретного типу забруднення та ґрунтових характеристик.¹⁸

Таблиця 2 (Продовження): Застосування AI/ML Алгоритмів у Ключових Меліоративних Викликах

Меліоративний Виклик	Завдання	Рекомендований AI/ML Алгоритм	Автори та Рік (Приклад)
Прогнозування ризику засолення	Ідентифікація впливу геохімічних факторів (наприклад, \$CO_2\$)	ML-системи, що оцінюють предиктори	Yao et al., 2023 ¹³
Оптимізація ремедіації	Моделювання кінетики хімічної	AI-моделі для оптимізації	Zhao M.M. et al., 2023;

	чи біологічної очистки ґрунтів	дозування та вибору штаму	Marschalko M. et al., 2022 ¹⁹
--	-----------------------------------	------------------------------	---

6: Практичні Приклади Впровадження в Агросфері України

Впровадження Smart-технологій в український меліоративний комплекс вимагає не лише використання глобальних інновацій, але й їхньої економічної та інфраструктурної адаптації.

6.1. Розробка та тестування IoT-мереж для зрошення в Україні (Кейс-стаді)

Українські дослідники зробили значний внесок у розробку адаптованих IoT-систем. Робота Ковальчука В., Войтовича О., Демчук О. та Демчука Д. (2020) зосереджувалася на створенні та тестуванні **низьковартісних IoT-мереж** для моніторингу повітря та ґрунту в рамках системи управління дощувальним зрошенням.⁵

- **Локація Тестування:** Тестування проводилося в агрофірмі в Херсонській області, що забезпечило перевірку системи в умовах, типових для великих українських зрошувальних земель.⁵

- **Архітектура та Сенсори:** Використовувався ансамбль сенсорів, включаючи Watermark та автоматичні тензіометри, для моніторингу вологи на кількох глибинах.⁵ Дослідження включало аналіз усієї ланки моніторингу, від сенсорного вузла до базової станції (BS).

- **Ключове Інженерне Рішення:** Для передачі зібраних даних на віддалений сервер було запропоновано та протестовано гібридну комунікаційну систему: комбінацію енергоефективного радіо **LoRa** та мобільного інтернету

(GSM). LoRa використовувалася для покриття великих територій, а мобільний інтернет був рекомендований для автономних точок моніторингу, віддалених від BS.⁵

Цей український приклад демонструє інженерну винахідливість, необхідну для подолання значних глобальних бар'єрів для впровадження AI-технологій, які включають високу вартість та неадекватну інфраструктуру.² Шляхом інтеграції бюджетних сенсорів та адаптації гібридних комунікаційних рішень, Smart-меліорація стає економічно життєздатною для агрокомплексів з обмеженим бюджетом, що є критичним фактором для регіонального розвитку.

6.2. Виклики та адаптація Smart-технологій до українських меліоративних систем

Для досягнення максимальної ефективності в українських умовах необхідно вирішити проблему вузькоспеціалізованих сенсорних рішень. Багато досліджень зосереджуються лише на вимірюванні вологості або солоності, тоді як меліорація вимагає **комплексного підходу**.³

Повноцінна Smart-меліорація повинна поєднувати фізико-хімічний аналіз ґрунту, методи вакуумного вилучення вологи, врахування механічного складу ґрунту, а також інтеграцію з існуючими великомасштабними водогосподарськими системами. Це вимагає впровадження комплексної механізації та автоматизації управління водними ресурсами за допомогою мікропроцесорної техніки та ЕОМ, що є передумовою для значного підвищення продуктивності меліорованих земель.³

7: Економічна Ефективність та Сталість Smart-Меліорації

Ефективність меліорації в цифрову еру оцінюється не лише за зростанням врожайності, а й за ступенем оптимізації використання ресурсів, яка забезпечується AI-системами.

7.1. Оцінка економічної ефективності

Smart-меліорація безпосередньо впливає на ключові економічні та екологічні показники:

1. **Коефіцієнт повторного використання меліорованих земель** та питома вага інтенсивних культур на цій площі.¹⁶
2. **Водомісткість виробництва:** Ключовий показник, який розраховується як об'єм витраченої зрошувальної води (m^3) на гектар або у вартісній формі (витрати води на 1000 грн валової продукції). AI-системи, як-от розроблена в Каліфорнії¹⁵, мають за мету саме мінімізацію цього показника.
3. **Водовіддача:** Обернений показник водомісткості, що відображає продуктивність на одиницю витраченої води.¹⁶

Хоча початкові витрати на впровадження Smart-систем, IoT та AI-інфраструктури залишаються високими², довгострокова економічна ефективність Smart-меліорації значно знижує ризики, пов'язані з глобальними змінами клімату та дефіцитом водних ресурсів. Інвестиції у PATs, які включають Smart-меліорацію, виправдані, оскільки вони дозволяють уникнути значних втрат врожаю, спричинених неоптимальним водним режимом, що підвищує стійкість аграрного бізнесу.¹ Високі початкові витрати розглядаються як необхідна страховка від кліматичних та економічних ризиків.

Таблиця 3: Порівняння Практичних Кейсів Smart-Меліорації (Україна та Світ)

Параметр	Кейс-стаді (Україна)	Кейс-стаді (Світ: США, Каліфорнія)
Географія	Херсонська область, Польові умови (дощування, великі площі)	Парльє, Каліфорнія (Сад мигдалю)
Основна Мета	Розробка та тестування бюджетної, інфраструктурно адаптованої IoT мережі	Максимальна економія води та оптимізація врожаю в умовах водного дефіциту
Ключові Технології	Низьковартісні сенсори, Гібридна комунікація (LoRa + GSM), БС	Комплексний AI-алгоритм (Карпин), Моделювання грунту (Хан), Фізіологічна модель рослини
Ключові Автори/Джерела	Kovalchuk V., Voitovich О. та ін., 2020 ⁵	Du W., Khan S., Carpin S., 2023/2025 ¹⁵
Результат/Цінність	Доведена працездатність IoT на великих площах та визначення вимог до інфраструктури в умовах України	Значне зниження водоспоживання завдяки ультра-точному дозуванню, підтверджуючи концепцію кліматичної стійкості

Розділ 8: Висновки та Перспективи Розвитку Smart-Меліорації

Сучасна меліорація ґрунтів є міждисциплінарною сферою, що вимагає інтеграції гідроінженерії, ґрунтознавства та передових комп'ютерних наук.

Синтез Аналізу:

1. **Прогностична Роль AI:** Штучний інтелект (AI/ML/DL) переводить меліорацію зі сфери, орієнтованої на реакцію, у прогностичну систему. Моделі DL, такі як LSTM, дозволяють передбачати динаміку процесів деградації (засолення, водний стрес) та оптимізувати ресурси проактивно.² Крім того, AI здатен виявляти приховані фактори деградації, такі як вплив підземного CO_2 на засолення.¹³

2. **Технологічна Адаптація:** Ефективність Smart-систем залежить від надійної IoT-інфраструктури, яка має бути адаптована до локальних умов. Український досвід демонструє, що використання гібридних комунікаційних рішень (LoRa/GSM) та низьковартісних сенсорів є практичним шляхом для забезпечення широкого впровадження технологій в умовах великих агрокомплексів.⁵

3. **Кліматична Стійкість:** Головна цінність Smart-меліорації полягає у досягненні екологічної та економічної стійкості. AI-керовані системи зрошення, такі як каліфорнійський кейс, демонструють можливість різкого зниження водомісткості виробництва, що є життєво необхідним для збереження водних ресурсів і підвищення глобальної продовольчої безпеки.¹

Перспективи для Магістрів за Освітньою Програмою «Охорона та Технології Відновлення Ґрунтів»:

Майбутні фахівці у сфері охорони ґрунтів повинні зосередитися на таких напрямках:

- **Розробка AI-моделей для ремедіації:** Створення та адаптація моделей ML/DL для оптимізації складних процесів фіто- та біоремедіації забруднених ґрунтів, а також для ефективного управління новими хімічними (наночастинки) та біотехнологічними методами відновлення.¹⁸

- **Регіональна Інтеграція:** Робота над інтеграцією локальних Smart-систем моніторингу в регіональні меліоративні мережі для управління водозабором та дренажним стоком на рівні гідрологічного басейну.

Подолання Бар'єрів Впровадження: Активна участь у зниженні економічних та технічних бар'єрів (висока вартість, обмежена технічна грамотність), що необхідно для забезпечення широкого впровадження технологій AI у фермерських господарствах.²

ЛЕКЦІЯ 11. Потенціал меліоративних заходів у процесі вирішення проблем територій, порушених внаслідок воєнних дій.

Відновлення функціонування біологічної складової ґрунту застосуванням органічних добрив і біологічних препаратів для ефективного використання територій, пошкоджених внаслідок воєнних дій, у сільськогосподарському виробництві є важливим напрямом в екологічному відновленні земельного потенціалу, пише журнал [The Ukrainian Farmer](#).



ФітореMediaція – очищення ґрунту вирощуванням рослин, що інтенсивно розкладають або засвоюють елементи забруднення і таким чином виносять їх із родючого шару ґрунту – ще один із дієвих шляхів, розроблених ученими.

Для таких цілей, зокрема, пропонується вирощування міскантуса гігантського, невибагливої енергетичної культури, що здатна забезпечити відносно дешевою енергетичною сировиною 17–25 т/га сухої маси вже на третій рік вирощування. Потужна коренева система міскантуса дозволяє пришвидшити відновлення гумусу, покращує ґрунтові властивості та різноманіття ґрунтової біоти.

Але за значного порушення земель є необхідним лишити ушкоджені території для відновлення їх природним шляхом. Хоча слід ураховувати, що відсутність рослинності підвищує ризики розвитку ерозійних процесів. Це потребує застосування додаткових протиерозійних заходів.

«Ми маємо в арсеналі достатньо широкий набір інструментів. Але у всякому разі відновлення родючості земель, порушених війною, потребує багато інтелектуальних сил, ресурсів і часу. Вирва, що утворилась у травні 2022 року біля Горлівки у жовтні того самого року, лишалась із мінімумом рослинності. Ця рана за пів року не загоїлась. Однак через підвищену мінералізацію органічної речовини та відсутність інтенсивного споживання поживних елементів на вільній від рослинності ділянці вирви насіння соняшнику краще сходило на [травмованому ґрунті](#) в нашому маленькому досліді. Тож маємо надію на те, що ми зможемо відновити нашу землю якнайшвидше», – зазначає Яна Погромська, науковий співробітник ННЦ «ІА імені О. Н. Соколовського».

З метою відновлення деградованих земель у степовій зоні України в післявоєнний період пропонується використовувати технологію фіторе mediaції. Для відновлення ґрунтового середовища та мікробіоти, які постраждали внаслідок 265 Меліорація і родючість ґрунтів військових дій, рекомендується вирощування гороху овочевого з додаванням мікробіологічних препаратів, оскільки їхнє сумісне застосування

значно впливає на накопичення гумусу. Ефективність фітореMediaції бобовими культурами, зокрема горохом, обумовлена здатністю бульбачкових бактерій, що мешкають у ґрунті після збирання рослин, до біоаккумуляції. При розкладанні ці бактерії перетворюються на гумус, сприяючи відновленню мікрофлори ґрунту. Враховуючи значні пошкодження ґрунтового середовища внаслідок військових дій, пропонується використання гороху у поєднанні з мікробіологічними препаратами для його рекультивації. Оскільки мікробіота ґрунту також зазнає негативного впливу воєнних дій, застосування таких препаратів може мінімізувати надходження важких металів до рослин. Це дозволить культурам нормально рости та розвиватися, а також утримати рівень забруднення врожаю на допустимому рівні. Забруднення земель є серйозною екологічною проблемою, яка вимагає комплексного підходу до вирішення. Вигорання полів призводить до порушення мікрофлори верхнього шару ґрунту. Внесення мікробіологічних препаратів може сприяти відновленню цієї мікрофлори, а також прискорити деградацію паливо-мастильних речовин у забруднених ґрунтах завдяки дії певних мікроорганізмів. Бобові культури, зокрема горох, володіють особливою здатністю до ризофільтрації. Ця властивість полягає у створенні навколо кореневої системи мікросередовища, яке сприяє концентрації та проникненню речовин у рослину. Вирощування бобових культур має ряд переваг: 1. Економічна доступність: ризофільтрація є відносно дешевим методом. 2. Широке використання: можна використовувати розповсюджені види рослин. 3. Екологічна ефективність: після збирання врожаю залишаються азотофіксуючі кореневі бульбочки, які збагачують ґрунт органічними рештками, підвищують гумус та покращують його якісний склад. Таким чином, рослини бобових культур відіграють важливу роль не тільки як джерело їжі та сировини, але й як фітореMediaнти, які беруть активну участь у підтримці екологічного балансу шляхом збільшення мікробіоти в ґрунті та відновлення його родючості. Збільшення посівних площ під бобові культури,

зокрема горохом, може стати ефективним методом відновлення деградованих земель на території півдня України у повоєнному відновленні порушених ґрунтів

ЛЕКЦІЯ 12. Гідромеліоративна інфраструктура Півдня України: історія, значення, наслідки руйнування та стратегії відновлення

Руйнація зрошувальних систем почалася ще у 2022 році — з початком повномасштабної війни з відключенням електроенергії та пошкодженням насосних станцій.

Особливо критичної шкоди було завдано найбільшій зрошувальній системі України, яка жила від Каховського магістрального каналу. Окупанти систематично руйнували його насосну станцію, і до листопада 2022 року через обстріли станцію було затоплено, що фактично зупинило роботу каналу ще до руйнування Каховської ГЕС.

Початкові збитки

5 тис. га
затоплено та
знищено посіви

\$5 млн
негайні збитки
від підриву

Довгострокові наслідки

+45%
сухих земель
після підриву
ГЕС

\$300 млн
щорічні довгострокові
втрати від припинення
зрошення

Вплив на ґрунти після підриву

Вище за течією:
зневоднення та
засолення через
висихання
територій

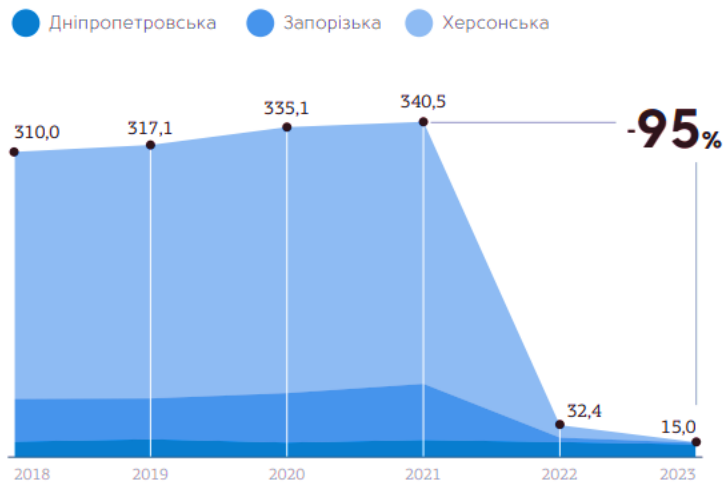
Нижче за течією:
вимивання родючого
шару ґрунту, засолення
та забруднення важкими
металами та іншими
забрудниками

Площа іригації до вторгнення

Середні показники за 2018–2021 роки



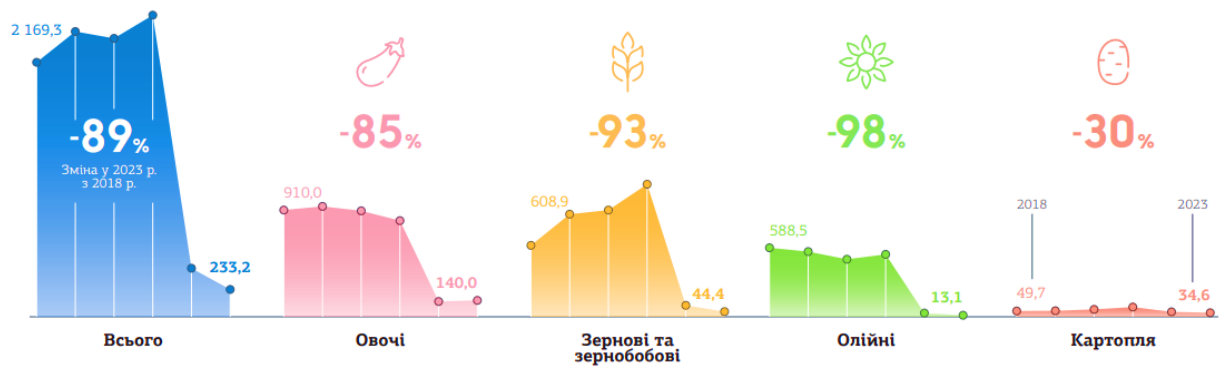
Зміни зрошуваної площі залежних від Каховського водосховища областей, тис. га



78% зрошуваних площ України залежали від Каховського водосховища. Це зрошення у Запорізькій, Дніпропетровській та Херсонській областях.

Виробництво с/г культур на зрошуваних землях у 2018–2023 рр., тис. т

Запорізька, Дніпропетровська та Херсонська області



Джерела: Дослідження руйнування Каховської греблі та його наслідки для екосистеми, аграріїв, цивільного життя та міжнародного правосуддя (Truth Hounds, Project Expedite Justice)

Інфографічний довідник Агробізнес України 2023/24

Лекція 13. Військові дії як чинник ґрунтової деградації: класифікація пошкоджень

13.1. Вплив воєнних дій на ґрунтовий покрив

Ґрунт є одним із природних ресурсів, який зазнає значного і часто довготривалого впливу внаслідок воєнних дій. Особливістю такого впливу є його комплексний характер: на одній ділянці можуть одночасно проявлятися механічне порушення ґрунтового профілю, ущільнення, хімічне забруднення, втрата органічної речовини, зниження біологічної активності та посилення ерозійних процесів.

У науковій літературі для опису такого комплексу пропонується розглядати деградацію, спричинену збройними конфліктами, як окремий тип антропогенної деградації - воєнну (військову) деградацію ґрунтів. Для неї характерне поєднання механічного, фізичного, хімічного та біологічного впливу, а також вторинних процесів, що розвиваються після безпосереднього пошкодження ґрунту.

Для України ця проблема має особливе значення. Уже до початку повномасштабної війни ґрунтовий покрив зазнавав ерозії, дегуміфікації, ущільнення, втрати структурності та інших форм деградації. Воєнні дії наклалися на ці процеси, посиливши антропогенне навантаження на ґрунтові ресурси.

Сучасні дослідження українських ґрунтів показують, що в місцях бойових дій пошкодження мають багатофакторний характер: наслідки пересування важкої техніки, вибухів, пожеж, уламкового забруднення, залишків палива та боєприпасів взаємодіють між собою.

13.2. Основні джерела воєнного впливу на ґрунт

Воєнні дії впливають на ґрунтовий покрив через різні механізми. Основними джерелами пошкодження є:

- вибухи боєприпасів;
- артилерійські та ракетні обстріли;
- авіаційні удари;
- переміщення важкої військової техніки;
- будівництво окопів, траншей, укриттів та інших фортифікаційних споруд;
- пожежі, спричинені бойовими діями;
- руйнування промислових, енергетичних, транспортних та складських об'єктів;
- витоки пального та мастильних матеріалів;
- накопичення уламків боєприпасів, техніки та будівельних матеріалів;
- мінування територій і наявність вибухонебезпечних предметів;
- порушення гідрологічного режиму територій унаслідок руйнування гідротехнічних споруд.

Важливо розрізняти безпосередній та опосередкований вплив. Безпосередній вплив проявляється у вирвах, перемішуванні горизонтів, ущільненні, забрудненні та вигорянні органічної речовини. Опосередкований — у подальшому розвитку ерозії, зміні водного режиму, міграції забруднювачів, порушенні ґрунтово-біологічних процесів та обмеженні господарського використання земель.

UNEP у попередній оцінці впливу конфлікту на довкілля України також наголошував на необхідності польових обстежень для встановлення характеру, масштабів та значущості воєнних впливів і визначення потреб у ремедіації.

13.3. Класифікація пошкоджень ґрунтів унаслідок воєнних дій

Хімічне забруднення ґрунтів

Хімічне забруднення формується внаслідок надходження до ґрунту речовин, здатних змінювати його властивості та негативно впливати на ґрунтові організми, рослини, водні ресурси й безпеку продукції.

В українському законодавстві забруднення ґрунтів визначається як накопичення в ґрунтах речовин, які негативно впливають на їх родючість та інші

корисні властивості. Окремо законодавство розмежовує поняття забруднення ґрунтів і засмічення земель. Останнє пов'язане з наявністю сторонніх предметів, матеріалів, відходів та інших речовин на земельній ділянці.

Основними джерелами хімічного забруднення є:

- компоненти та продукти трансформації вибухових речовин;
- паливо і мастильні матеріали;
- продукти горіння;
- метали з боєприпасів та військової техніки;
- промислові забруднювачі внаслідок руйнування підприємств;
- забруднені води;
- зола та продукти пожеж;
- відходи зруйнованої інфраструктури.

Серед потенційно небезпечних елементів у воєнно-пошкоджених ґрунтах особливе значення мають свинець, кадмій, цинк, мідь, нікель, барій та інші елементи. Дослідження українських ґрунтів у місцях бойових дій підтверджують підвищення вмісту важких металів, причому рівень забруднення істотно відрізняється залежно від конкретної локації та типу воєнного впливу.

При оцінюванні хімічного стану ґрунту важливо визначати не лише загальний вміст елемента, а й його рухомі та потенційно доступні форми. Саме вони значною мірою визначають можливість міграції забруднювача, його доступність для рослин та ризик потрапляння до суміжних компонентів екосистеми.

Забруднення нафтопродуктами

Окремою категорією є забруднення нафтопродуктами. Воно може виникати в місцях знищення військової техніки, пошкодження паливних систем, складів пального та інших об'єктів.

Нафтопродукти можуть негативно впливати на фізичні властивості ґрунту та функціонування мікробного угруповання. У разі високого рівня забруднення вони створюють несприятливі умови для проростання насіння та розвитку кореневої системи.

У наведених у цьому посібнику експериментальних дослідженнях ґрунтів Харківської області виявлено значне збільшення вмісту нафтопродуктів у ґрунті з-під згорілої військової техніки. Подальші досліді показали можливість зниження концентрації нафтопродуктів за застосування біологічних композицій, що містять вуглеводнеоокислювальні мікроорганізми.

Цей приклад демонструє важливий принцип: один воєнний чинник може одночасно формувати кілька типів деградації. Горіння техніки спричиняє нагрівання та фізичне пошкодження, надходження нафтопродуктів — хімічне забруднення, а зміна умов існування мікроорганізмів — біологічне порушення.

Біологічні пошкодження ґрунтів

Ґрунт є живою функціональною системою, у якій мікроорганізми, ґрунтова фауна та рослинні організми забезпечують значну частину процесів трансформації органічної речовини та кругообігу елементів.

Воєнний вплив може порушувати ці процеси через:

- ущільнення ґрунту;
- нагрівання та пожежі;
- механічне руйнування ґрунтового профілю;
- хімічне забруднення;
- знищення рослинного покриву;
- зміну водного та повітряного режимів.

У дослідженнях ґрунтів України, пошкоджених бойовими діями, зафіксовано зміни структури мікробіому, зниження мікробної біомаси та пригнічення активності

окремих мікробіологічних процесів. В одному з досліджень, проведеному на воєнно-пошкоджених ґрунтах, було також виявлено істотне підвищення частки міцеліальних організмів та високий рівень токсичності досліджуваних зразків.

У наведених експериментах із ґрунтом, пошкодженим горінням техніки, біогенність ґрунту зменшилася приблизно на 30 %. Це свідчить про порушення функціональної активності ґрунтової біоти.

Тому оцінювання воєнно-пошкоджених земель не повинно обмежуватися визначенням концентрації хімічних забруднювачів. Важливо оцінювати також біологічний стан ґрунту.

Засмічення та вибухонебезпечне забруднення

Після бойових дій на земельній ділянці можуть залишатися уламки боєприпасів, металеві частини техніки, залишки будівельних конструкцій, паливні матеріали та інші сторонні предмети.

Такі об'єкти необхідно відрізняти від власне хімічного забруднення. В українській нормативній термінології наявність сторонніх предметів, матеріалів і відходів на земельній ділянці визначається як засмічення земель.

Особливу категорію становлять вибухонебезпечні предмети. Наявність мін та нерозірваних боєприпасів є не лише екологічною, а передусім безпековою проблемою. До завершення обстеження та розмінування проведення ґрунтових і агротехнічних робіт на таких територіях є небезпечним.

FAO підкреслює, що забезпечення безпеки та очищення сільськогосподарських земель від вибухонебезпечних залишків війни є першим кроком до відновлення виробництва на постраждалих територіях України.

Вторинні процеси деградації

Безпосереднє пошкодження ґрунту вибухом або технікою часто запускає ланцюг вторинних процесів.

Комплексні воєнні пошкодження

На практиці окремі типи деградації рідко існують ізольовано.

Наприклад, територія згорілої військової техніки може характеризуватися:

- механічним порушенням ґрунту;
- температурним впливом;
- забрудненням нафтопродуктами;
- накопиченням металів;
- зниженням біологічної активності;
- втратою рослинного покриву;
- подальшим розвитком ерозії.

Сучасні дослідження українських ґрунтів підтверджують саме таку картину: на досліджених ділянках одночасно виявляли механічну, фізичну та хімічну деградацію, а також зміни мікробіологічних характеристик.

Класифікація за просторовим характером пошкодження

Для практичного обстеження земель важливо враховувати не лише тип деградації, а й її просторовий характер.

За цим критерієм можна виділити:

Точкові пошкодження

Характерні для місць окремих вибухів, вирв, згорілої техніки або локальних витоків пального.

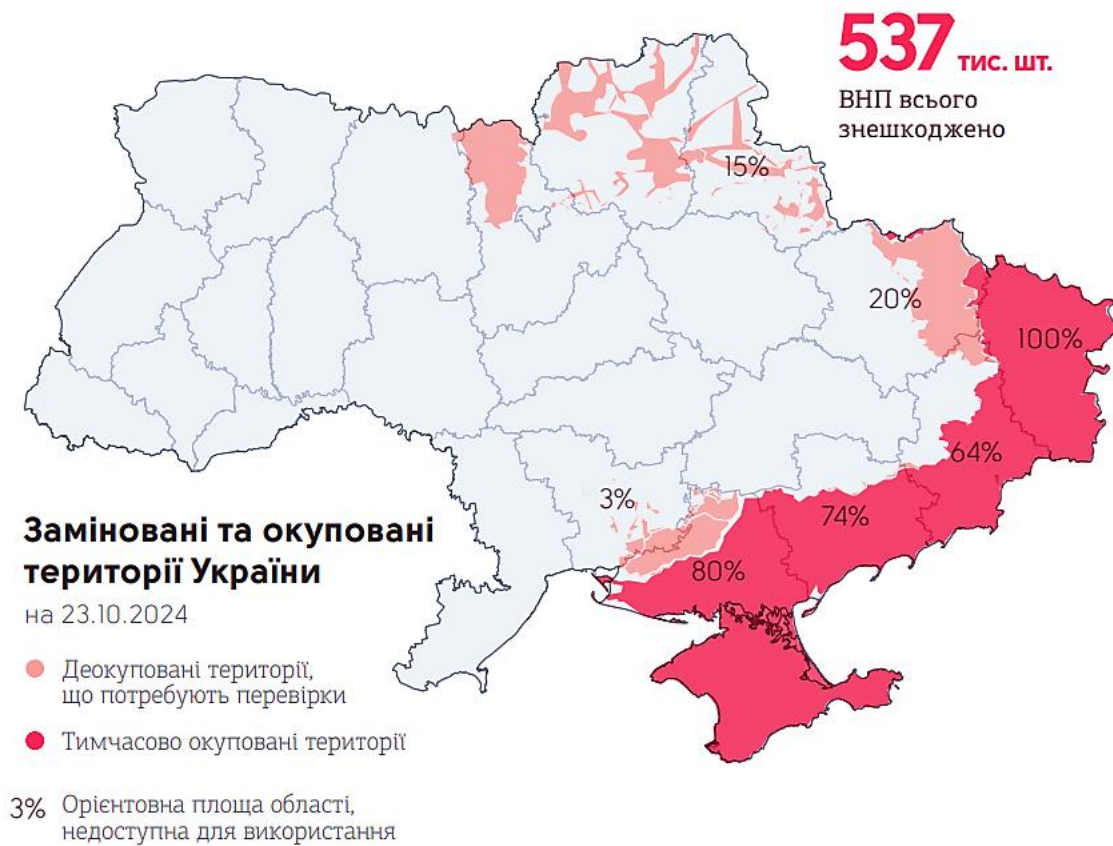
Лінійні пошкодження

Формуються вздовж траншей, окопів, військових шляхів, колій руху техніки та інших лінійних об'єктів.

Площинні пошкодження

Охоплюють значні території, на яких відбувалися інтенсивні бойові дії, систематичне переміщення техніки або масштабне мінування.

Такий підхід має практичне значення, оскільки просторова неоднорідність воєнного впливу визначає схему відбору проб, масштаб картографування та вибір заходів відновлення.



Показники для діагностики воєнно-пошкоджених ґрунтів

Для оцінювання стану ґрунтів, пошкоджених воєнними діями, доцільно використовувати систему взаємопов'язаних показників.

Фізичні показники

- щільність складення;
- гранулометричний склад;

- структурний стан;
- загальна пористість;
- водопроникність;
- водотривкість агрегатів;
- потужність гумусового горизонту;
- ступінь механічного порушення профілю.

Агрохімічні показники

- вміст гумусу;
- реакція ґрунтового розчину (pH);
- вміст доступних форм азоту, фосфору і калію;
- ємність катіонного обміну;
- вміст рухомих форм металів;
- вміст нафтопродуктів.

Хімічні показники забруднення

Залежно від характеру воєнного впливу визначають вміст потенційно небезпечних металів та інших специфічних забруднювачів. Перелік аналізованих речовин має визначатися результатами попереднього обстеження та джерелом забруднення.

Біологічні показники

- мікробна біомаса;
- чисельність основних функціональних груп мікроорганізмів;
- інтенсивність мікробіологічних процесів;
- ферментативна активність;
- показники біогенності;
- стан ґрунтової мезо- та макрофауни.

Такий комплексний підхід відповідає сучасному розумінню ґрунтового здоров'я, за якого ґрунт оцінюють не лише за вмістом окремих речовин, а за його здатністю виконувати екологічні та продукційні функції.

13.4. Особливості оцінювання воєнно-пошкоджених земель

В Україні вже створено нормативну основу для документування шкоди, завданої землі та ґрунтам унаслідок надзвичайних ситуацій, збройної агресії та бойових дій. Наказом Міндовкілля № 167 від 04.04.2022 затверджено відповідну методику визначення розміру шкоди; нормативний документ окремо використовує поняття забруднення ґрунтів та засмічення земель.

Для земельного фонду України діє також Методика визначення шкоди та збитків, завданих земельному фонду України внаслідок збройної агресії, затверджена наказом Мінагрополітики № 295 від 18.05.2022; її чинна редакція була оновлена у 2025 р.

Водночас визначення економічної шкоди і визначення фактичного екологічного стану ґрунту — це різні завдання. Для прийняття рішення щодо подальшого використання конкретної земельної ділянки необхідні польове обстеження, відбір проб та лабораторна оцінка.

Наслідки воєнної деградації для агроценозів

Порушення ґрунтових властивостей безпосередньо впливає на функціонування агроценозу.

Основними наслідками є:

- зниження потенційної продуктивності ґрунту;
- погіршення водного і повітряного режимів;
- зниження доступності елементів живлення;
- пригнічення ґрунтової біоти;

- токсичний вплив окремих забруднювачів на рослини;
- ризик накопичення токсичних елементів у рослинній продукції;
- посилення ерозійних процесів;
- порушення функціонування ґрунтового профілю;
- збільшення витрат на відновлення та подальше сільськогосподарське використання земель.

Особливо важливим є те, що воєнна деградація може мати довготривалий характер. Навіть після припинення бойових дій залишаються забруднювачі, змінені властивості ґрунту, порушений рельєф, мінна небезпека та вторинні деградаційні процеси.

13.5. Принципи подальшого відновлення

Відновлення воєнно-пошкодженого ґрунту має розпочинатися не з безпосереднього внесення добрив або біологічних препаратів, а з оцінювання безпеки та діагностики стану ділянки.

Загальна послідовність має бути такою:

1. Оцінювання безпеки території
2. Розмінування та очищення від вибухонебезпечних предметів.

- Польове обстеження
- Відбір ґрунтових проб.
- Лабораторна діагностика
- Класифікація типу та ступеня пошкодження
- Вибір технології відновлення
- Проведення ремедіаційних і меліоративних заходів
- Повторний моніторинг
- Оцінювання можливості безпечного господарського використання.

Такий підхід відповідає сучасній практиці оцінювання наслідків конфліктів: до визначення конкретних заходів ремедіації необхідно встановити характер, масштаб і значущість забруднення та інших форм впливу.



Рис. Вплив воєнних дій на ґрунти

Схема створена за допомогою Gemini

1. Воєнні дії є специфічним чинником деградації ґрунтів, який характеризується одночасною дією механічних, фізичних, хімічних і біологічних чинників.
2. Найбільш типовими проявами воєнного пошкодження є руйнування ґрунтового профілю, утворення вирв, ущільнення, втрата рослинного покриву, забруднення нафтопродуктами та металами, накопичення уламків і вибухонебезпечних предметів.

3. Реальні воєнно-пошкоджені ґрунти зазвичай характеризуються не одним, а кількома типами деградації одночасно. Тому їх необхідно розглядати як об'єкти **комплексного пошкодження**.
4. Хімічне забруднення не можна оцінювати лише за загальним умістом забруднювача. Важливе значення мають його рухомість, доступність для рослин та потенційна міграція у ґрунтовому профілі.
5. Важливим показником стану воєнно-пошкодженого ґрунту є його біологічна активність, оскільки порушення мікробіологічних процесів свідчить про втрату частини ґрунтових функцій.
6. Для обґрунтування подальшого використання пошкоджених земель необхідне комплексне польове та лабораторне обстеження.
7. Ремедіаційні заходи повинні добиратися диференційовано — відповідно до типу, інтенсивності та просторової неоднорідності пошкодження.
8. Повернення воєнно-пошкоджених земель до сільськогосподарського використання має передбачати не лише усунення безпосереднього забруднення, а й **відновлення фізичних, хімічних і біологічних функцій ґрунту**.

ЛЕКЦІЯ 14. Меліорація сільськогосподарських угідь, пошкоджених під час воєнних дій

14.1. Ґрунти, пошкоджені внаслідок воєнних дій: деградація, забруднення та напрями відновлення

Військові дії є одним із найпотужніших антропогенних чинників порушення ґрунтового покриву. На відміну від багатьох традиційних форм деградації, воєнне навантаження характеризується одночасною дією механічних, фізичних, хімічних та біологічних чинників. Унаслідок бойових дій ґрунти можуть зазнавати руйнування структури, ущільнення, втрати органічної речовини, ерозії, забруднення нафтопродуктами, важкими металами та іншими потенційно небезпечними речовинами.

Проблема відновлення таких ґрунтів є особливо актуальною для України, де значні площі сільськогосподарських угідь зазнали безпосереднього або опосередкованого впливу воєнних дій. При цьому наслідки можуть зберігатися тривалий час після припинення бойових дій. Тривалість відновлення залежатиме від характеру пошкодження, властивостей ґрунту, типу забруднювачів, ступеня їх концентрації, глибини проникнення, гідрологічних умов та ефективності застосованих заходів ремедіації.

Довоєнний стан ґрунтового покриву

До початку повномасштабної війни українські ґрунти вже зазнавали значного антропогенного навантаження. Серед основних процесів деградації особливе місце посідали водна і вітрова ерозія, дегуміфікація, ущільнення, втрата структурності, порушення водного режиму та хімічне забруднення.

Однією з причин посилення ерозійних процесів є інтенсивне землеробство за недостатнього застосування ґрунтозахисних технологій. Надмірний механічний обробіток, недостатнє повернення органічної речовини, порушення сівозмін та інші чинники знижують стійкість ґрунту до ерозії та погіршують його здатність до самовідновлення.

Ерозія є не лише проблемою збереження родючості ґрунту. Втрата верхнього шару призводить до зменшення потужності гумусового горизонту, зниження запасів органічного вуглецю, погіршення водно-фізичних властивостей та зменшення

продуктивності земель. У довгостроковій перспективі деградація ґрунтів може трансформуватися з екологічної проблеми у проблему економічної, соціальної та продовольчої безпеки.

14.2.Воєнні дії як чинник деградації ґрунтів

Хімічне забруднення ґрунтів

Одним із найбільш небезпечних наслідків бойових дій є надходження до ґрунту потенційно токсичних речовин. Під час використання та руйнування боєприпасів утворюються продукти вибуху, а в ґрунт можуть потрапляти компоненти вибухових речовин, метали, сполуки сірки та азоту та інші речовини.

Особливу увагу привертає забруднення важкими металами. У зонах бойових дій у ґрунтах можуть підвищуватися концентрації свинцю, міді, цинку, кадмію, нікелю, барію та інших елементів. Їх фактичний вміст необхідно визначати лабораторно, оскільки ступінь забруднення істотно залежить від типу боєприпасів, інтенсивності обстрілів, властивостей ґрунту та інших локальних умов.

Небезпека металів визначається не лише їх загальним вмістом. Важливе значення має рухомість і біодоступність елементів, тобто здатність переходити у ґрунтовий розчин, поглинатися рослинами та мігрувати у профілі ґрунту.

Певні хімічні компоненти можуть змінювати реакцію ґрунтового середовища та впливати на ґрунтову біоту. У результаті порушуються процеси мінералізації та гуміфікації органічної речовини, кругообіг елементів живлення і функціонування ґрунтової екосистеми.

Фізична деградація ґрунтів

Не менш важливим наслідком воєнного впливу є фізичне порушення ґрунту. Проходження важкої техніки призводить до ущільнення, зменшення загальної пористості та погіршення водопроникності. Особливо небезпечним є ущільнення верхніх горизонтів, оскільки воно обмежує розвиток кореневої системи та газообмін.

Вибухи формують локальні порушення ґрунтового профілю. Ґрунтовий матеріал може викидатися з вирви, перемішуватися та перерозподілятися по прилеглій території. Унаслідок цього природна диференціація ґрунтових горизонтів порушується.

Пожежі, своєю чергою, можуть призводити до втрати рослинного покриву та часткового знищення органічної речовини. Після цього оголена поверхня стає більш уразливою до ерозії.

Отже, формується взаємопов'язаний ланцюг:

механічне порушення → ущільнення → зниження водопроникності → посилення поверхневого стоку → ерозія → подальша втрата родючого шару.

Інші чинники воєнного забруднення

Окрему проблему становлять нафтопродукти, які потрапляють у ґрунт унаслідок пошкодження військової та цивільної техніки, резервуарів, паливних систем та інфраструктурних об'єктів.

Нафтопродукти можуть змінювати водно-фізичні властивості ґрунту, пригнічувати ґрунтову мікробіоту та негативно впливати на проростання і розвиток рослин. Їх міграція залежить від властивостей забруднювача, гранулометричного складу ґрунту, його вологості, температури та гідрологічного режиму.

Ще одним чинником є руйнування шахтної та промислової інфраструктури. Затоплення шахт, зміна напрямів руху підземних вод і надходження забруднених вод можуть спричиняти вторинне забруднення ґрунтів та поверхневих і підземних вод.

Мінування сільськогосподарських земель створює окремий тип ризику. Навіть за відсутності значного хімічного забруднення такі землі не можуть безпечно використовуватися до завершення обстеження та розмінування.

14.3.Відновлення воєнно-пошкоджених ґрунтів

Відновлення ґрунтів після воєнних дій має базуватися не на одному універсальному заході, а на комплексній системі оцінювання, очищення та відновлення.

Першим етапом є забезпечення безпеки території. До початку ґрунтових досліджень і будь-яких агротехнічних робіт необхідно провести інженерне обстеження та розмінування.

Другий етап - діагностика стану ґрунту. Вона передбачає визначення характеру фізичного порушення, рівня хімічного забруднення, стану органічної речовини, кислотно-основних та водно-фізичних властивостей, а за потреби — біологічної активності ґрунту.

На основі результатів діагностики визначають необхідність і технологію ремедіації. Залежно від характеру порушень можуть застосовуватися фізичні, хімічні, біологічні та фітомеліоративні методи.

Одним із перспективних біологічних напрямів є фіторемедіація - використання рослин для вилучення, іммобілізації або локалізації забруднювачів. Ефективність цього підходу залежить від виду забруднювача, його концентрації та форми, властивостей ґрунту і біологічних особливостей рослин.

Важливе значення має також біоремедіація, що передбачає використання живих організмів, передусім мікроорганізмів і рослин, для трансформації або вилучення забруднювальних речовин. Рослини можуть поглинати й накопичувати окремі елементи, локалізувати забруднення та формувати ризосферу, сприятливу для розвитку мікроорганізмів. Мікроорганізми, своєю чергою, беруть участь у трансформації органічних забруднювачів і відновленні біологічної активності ґрунту.

Для відновлення фізичних властивостей ґрунту можуть застосовуватися розущільнення, внесення органічних матеріалів, вирощування покривних культур,

сидератів і багаторічних трав. Такі заходи спрямовані на відновлення структури, підвищення вмісту органічної речовини, покращення водопроникності та активізацію ґрунтової біоти.

Таким чином, ремедіація воєнно-пошкоджених ґрунтів має поєднувати очищення від забруднювачів із відновленням ґрунтових функцій. Метою є не лише зниження концентрації окремої токсичної речовини, а повернення ґрунту до безпечного та функціонально стабільного стану.

14.4. Приклад експериментального дослідження

Біологічна ремедіація воєнно-пошкоджених ґрунтів

Важливим наслідком воєнного забруднення є порушення функціонування ґрунтової мікробіоти. Мікробіологічний аналіз ґрунту з ділянки, де відбулося горіння військової техніки, засвідчив негативні зміни чисельності та активності основних груп мікроорганізмів у шарі 0–20 см. За результатами дослідження, біогенність ґрунту зменшилася приблизно на 30 % порівняно з непорушеною ділянкою.

Зниження біологічної активності свідчить про порушення функціонування ґрунтової екосистеми та її здатності забезпечувати природні процеси трансформації органічної речовини й кругообіг елементів живлення.

Відновлення такого ґрунту передбачає комплекс заходів, спрямованих на:

- зниження концентрації нафтопродуктів;
- відновлення агрохімічних властивостей;
- зменшення доступності токсичних металів для рослин;
- відновлення біологічної активності ґрунту;
- забезпечення сприятливих умов для росту і розвитку сільськогосподарських культур.

Одним із напрямів відновлення є внесення органічних матеріалів — соломи, торфу, компосту, гною, дефекату та інших органічних добрив. Вони можуть сприяти відновленню запасів органічної речовини, покращенню фізичних властивостей ґрунту та активізації ґрунтової мікробіоти.

У разі істотного порушення азотного і фосфорного живлення органічні матеріали можуть доповнюватися мінеральними добривами. Важливе значення мають також мікробіологічні препарати, що містять живі мікроорганізми та продукти їх життєдіяльності. Їх застосування спрямоване на відновлення функціональної активності мікробного угруповання та прискорення трансформації органічних забруднювачів.

Окремим завданням є підбір сільськогосподарських культур, толерантних до конкретного рівня та характеру забруднення.

14.5. Експериментальні напрями біологічної ремедіації

У дослідженнях з відновлення ґрунтів, пошкоджених унаслідок воєнних дій, було сформовано три основні напрями.

Перший напрям — ремедіація локально забруднених нафтопродуктами ґрунтів.

Для цього були розроблені композиції препаратів на основі вуглеводнеокислювальних бактерій, органічних речовин та біогенних елементів. В експерименті досліджували три композиції — препарати № 1, № 2 і № 3, які вносили у кількості 5, 10 та 12 % відповідно до маси ґрунту.

За 90 діб експерименту вміст нафтопродуктів у варіантах із застосуванням досліджуваних препаратів зменшився на 59–92 % порівняно з початковим рівнем. Найвищий показник деструкції нафтопродуктів — 92 % — зафіксовано у варіанті із застосуванням препарату № 3.

Значне зниження вмісту нафтопродуктів спостерігалось також за внесення торфу. У цьому варіанті торф і ґрунт змішували у співвідношенні 1:1.

Дослідження мікробіологічних показників показало, що після внесення препаратів відбулася перебудова мікробного угруповання. Загальна біогенність у деяких варіантах зменшувалася, водночас збільшувалася чисельність мікроорганізмів, які використовують азотовмісні органічні сполуки. Одночасно підвищувався коефіцієнт трансформації органічної речовини. Це може свідчити про активізацію процесів мікробіологічної трансформації органічних забруднювачів.

Другий напрям — застосування біологічного препарату для суцільного внесення.

У досліджах використовували препарат «Екостерн detox», до складу якого входять живі мікроорганізми та продукти їх життєдіяльності. Препарат застосовували у нормі 1,5 л/га.

Через 90 діб після внесення спостерігалось наближення структури мікробного угруповання забрудненого ґрунту до показників непорушеної ділянки. Це свідчить про потенційну ефективність мікробіологічних препаратів як складової біологічної ремедіації.

Третій напрям — використання органічних матеріалів.

У дослідженні як органічний матеріал використовували торф. Його застосування сприяло зменшенню концентрації нафтопродуктів та створювало умови для відновлення фізико-хімічних і біологічних властивостей ґрунту.

Вплив ремедіаційних заходів на розвиток рослин

Для оцінювання ефективності застосованих заходів досліджували реакцію кукурудзи, соняшнику та пшениці.

Кукурудза характеризувалася доброю схожістю у всіх досліджуваних варіантах. Для пшениці менш сприятливими виявилися умови із застосуванням препарату № 3. Соняшник виявив більшу чутливість до умов досліджу.

Найкращі показники розвитку рослин у низці варіантів отримано за використання торфу, препарату № 1 у поєднанні з торфом та препарату «Екостерн detox».

За внесення торфу приріст надземної маси кукурудзи становив 45 % порівняно з відповідним контролем. У варіанті із застосуванням препарату № 1 у поєднанні з торфом приріст становив 14 %.

Для соняшнику найбільш виражений ефект спостерігався за використання препарату № 1 у поєднанні з торфом: приріст надземної маси становив 297 %. За внесення «Екостерн detox» приріст надземної маси становив 24 %.

Для пшениці застосування «Екостерн detox» забезпечило приріст надземної маси на 27 %. У цьому варіанті показники рослин перевищували відповідні значення на непорушеному ґрунті.

Оцінювання фізіологічного стану рослин доповнювали дослідженнями індукції флуоресценції хлорофілу. Цей метод дає змогу оцінити функціональний стан фотосинтетичного апарату та потенціал рослин до поглинання і використання світлової енергії.

Отримані результати свідчили про збереження функціональної активності фотосинтетичного апарату рослин у досліджуваних варіантах. Водночас для оцінювання довгострокової ефективності ремедіації необхідні дослідження протягом усього періоду вегетації та наступних етапів розвитку рослин.

14.6. Ремедіація ґрунту, порушеного вибухом

Окрему серію досліджень проведено на ґрунті, порушеному внаслідок вибуху. Для аналізу було відібрано три зразки: з центральної частини вирви, з її краю та з контрольної ділянки, розташованої на відстані 20 м від епіцентру вибуху.

Досліджували дію препарату «Екостерн detox» у поєднанні з мінеральними добривами та соломою. Вибір компонентів ґрунтувався на результатах попереднього агрохімічного аналізу.

У порушеному ґрунті вміст гумусу зменшився приблизно вдвічі. Одночасно істотно знизився вміст азоту, тоді як концентрація калію збільшилася більш ніж удвічі. Вміст фосфору змінився незначно. Така зміна співвідношення елементів живлення на фоні підвищеного вмісту важких металів є несприятливою для розвитку рослин.

З огляду на виявлені порушення в експерименті застосовували азотно-фосфорні добрива та солому як джерело органічної речовини.

Через 90 діб після початку експерименту в усіх досліджуваних варіантах спостерігалася тенденція до збільшення вмісту гумусу, у тому числі у варіанті, де застосовували лише «Екостерн detox». У варіантах із внесенням мінеральних сполук азоту і фосфору збільшувався вміст відповідних елементів живлення.

Одночасно істотно підвищувалася біологічна активність ґрунту. Зростання коефіцієнта трансформації органічної речовини у поєднанні зі зниженням напруженості мінералізаційних процесів може свідчити про активізацію процесів гумусонакопичення.

Застосування «Екостерн detox» без додаткових компонентів забезпечувало збільшення надземної маси рослин приблизно на 7–10 %. Поєднання препарату з мінеральними добривами забезпечувало вищі показники розвитку рослин.

Результати оцінювання індукції флуоресценції хлорофілу також продемонстрували відмінності між досліджуваними ділянками. Вищі значення відповідних показників були характерними для ґрунту, відібраного з краю вирви та контрольної ділянки, що свідчить про відмінності у функціональному стані рослин залежно від ступеня порушення ґрунту.

14.7. Практичні підходи до біологічної ремедіації

Результати наведених експериментів демонструють перспективність використання біологічних засобів як одного з компонентів комплексної системи відновлення воєнно-пошкоджених ґрунтів. Водночас результати модельних і вегетаційних дослідів не можуть автоматично переноситися на всі типи забруднених ґрунтів. Вибір технології має здійснюватися з урахуванням результатів попереднього обстеження конкретної ділянки.

За умов інтенсивного локального забруднення нафтопродуктами перспективним є використання композицій на основі вуглеводнеокислювальних мікроорганізмів. У наведеному експерименті застосування препаратів № 1, № 2 і № 3 забезпечило зниження вмісту нафтопродуктів на 59–92 % від початкового рівня.

За значного фізичного порушення ґрунтового покриву та руйнування генетичних горизонтів перспективним може бути комплексне застосування мікробіологічних препаратів, органічних матеріалів і мінеральних добрив. У досліді із «Екостерн detox» застосування препарату в поєднанні з мінеральним живленням та органічними матеріалами сприяло відновленню біологічної активності ґрунту та покращенню розвитку рослин.

У разі забруднення важкими металами особливого значення набуває вибір сільськогосподарських культур. Необхідно враховувати не лише толерантність рослин до забруднення, а й здатність накопичувати токсичні елементи в різних органах. Для продовольчих культур принципово важливим є недопущення накопичення небезпечних концентрацій токсикантів у продукції.

Отже, біологічна ремедіація не повинна розглядатися як самостійний універсальний метод очищення воєнно-пошкоджених ґрунтів. Її доцільно використовувати як складову **інтегрованої системи відновлення**, яка поєднує діагностику забруднення, фізичні та агротехнічні заходи, регулювання поживного

режиму, застосування органічних матеріалів, мікробіологічні технології та фітомеліорацію.

Ефективність ремедіаційних заходів має оцінюватися не лише за зміною концентрації забруднювачів, а й за відновленням комплексу ґрунтових функцій: біологічної активності, трансформації органічної речовини, поживного режиму, водно-фізичних властивостей та здатності ґрунту забезпечувати безпечний розвиток рослин.

Лекція 15. Світовий досвід у відновленні ґрунтів після війни

Відновлення земель після збройних конфліктів є складним багатоаспектним завданням, що охоплює поєднання екологічних, соціальних, правових та економічних чинників. Наслідки війни нерідко залишають по собі руїни земель, деградацію екосистем і вимушене переміщення населення. Вирішення цих проблем вимагає ґрунтового знання теоретичних засад відновлення земель, а також практичних інструментів і міжнародних стандартів, що сприяють цьому процесу.

В основі постконфліктного відновлення земель знаходиться складна система деградації довкілля, спричинена військовими діями. Збройні конфлікти, як правило, призводять до цілої низки екологічних збитків, зокрема, вирубки лісів, ерозії ґрунтів, забруднення боєприпасами та хімічними речовинами, руйнування природних біотопів і вичерпання водних ресурсів. Такі збитки не лише ставлять під загрозу екологічну цілісність землі, але й мають значні наслідки для людського здоров'я, життєдіяльності та сталого розвитку.

Однією з основних проблем відновлення земель після конфлікту є масштаб і складність цього завдання. Ступінь деградації довкілля значно варіюється залежно від таких факторів, як тривалість та інтенсивність конфлікту, види зброї, що застосовуються, та географічні характеристики постраждалих територій. Окрім того, наявність боєприпасів, що не вибухнули, і наземних мін створює значну загрозу безпеці та ускладнює доступ до критично важливих земельних ділянок, що ще сильніше гальмує відновлювальні роботи.

Не можна також забувати про соціальні та економічні аспекти постконфліктного відновлення земель. Переміщені спільноти часто стикаються з труднощами, намагаючись повернути свої землі та відновити засоби до існування після війни. Доступ до основних ресурсів, таких як вода, рілля і ліси, часто обмежений, що призводить до посилення бідності та продовольчої незахищеності.

Реінтеграція біженців і внутрішньо переміщених осіб, що повертаються, у їхні колишні спільноти з одночасним забезпеченням сталого землекористування є складним завданням. Враховуючи вище наведене, варто відзначити ситуацію про недостатній рівень, а то й відсутність розроблених юридичних норм в контексті забезпечення прав громадян України щодо відшкодування збитків за загарбання їх земель, які знаходяться на окупованих територіях.

У відповідь на ці проблеми міжнародні організації, уряди та неурядові суб'єкти розробили низку стандартів, рамок і методів, якими можна керуватися при відновленні земель у постконфліктних ситуаціях. Ці ініціативи ґрунтуються на принципах збереження довкілля, сталого розвитку та прав людини, що є основою їхнього підходу. До числа основних міжнародних стандартів належить Конвенція про заборону застосування, накопичення запасів, виробництва і передачі протипіхотних мін та про їхнє знищення (більш відома як Оттавський договір), метою якої є заборона використання наземних мін і сприяння їхньому знешкодженню та відновленню. Програма ООН з охорони навколишнього середовища (ЮНЕП) теж розробила настанови щодо оцінки і подолання наслідків збройних конфліктів для довкілля, включаючи рекомендації з відновлення і реабілітації земель.

Методи відновлення земель у поствоєнних ситуаціях охоплюють низку різних підходів - від екологічного відновлення та лісовідновлення до управління земельними ресурсами на базі територіальних громад і сталого сільського господарства (табл. 1). Такі методи, як стабілізація ґрунтів, боротьба з ерозією та раціональне використання водних ресурсів, відіграють ключову роль у відновленні екологічних функцій деградованих земель. Разом з тим, ініціативи, що сприяють громадській участі, розбудові потенціалу та створенню сталих засобів до існування, мають неабияке значення для забезпечення довгострокового розвитку та стійкості заходів з відновлення земельних ресурсів.

Таблиця 1

Метод	Характеристика	Країна
Лісовідновлення	Висадка дерев для відновлення біорізноманіття та ґрунту	Афганістан, Колумбія, Демократична Республіка Конго
Розмінування території	Знешкодження наземних мін для забезпечення безпечного доступу та використання земель	Камбоджа, Боснія і Герцеговина, Мозамбік
Рекультивація земель	Рекультивація земель для сільськогосподарських цілей	Руанда, Південний Судан, Ірак
Екологічне відновлення	Відновлення цілісних природних екосистем	Сирія, Ємен
Міське господарство	Відновлення міських територій, пошкоджених внаслідок конфлікту	Ірак, Сирія, Афганістан
Знання місцевих жителів	Залучення знань і практик місцевих жителів для відновлення земель	Колумбія, М'янма, Гватемала
Місцеві громади	Залучення місцевих громад до відновлювальних робіт	Ліберія, Сьєрра-Леоне, Сомалі
Технології	Використання технологій для точного відновлення	Ізраїль, Ліван, Лівія
Міжнародні організації	Координація з міжнародними організаціями ООН, ЄС, Світовим банком	У всіх постраждалих від конфліктів країнах

Результати аналізу методів відновлення земель, що постраждали від збройних конфліктів, свідчать про різноманітність підходів і практик, що застосовуються в різних регіонах світу. Наслідки війни завдають значного удару по землях, а екологічна деградація, соціальна дислокація та економічна розруха стають

серйозними викликами для відновлювальних робіт. Розглядаючи різні стратегії та ініціативи, реалізовані в постконфліктних ситуаціях по всьому світу, стає зрозумілим, що успішне відновлення вимагає детального врахування місцевого специфічного середовища в поєднанні з комплексним підходом, що інтегрує екологічні, соціально-правові і фінансово-економічні аспекти.

У регіонах, таких як Балкани, де конфлікти 1990-х років залишили по собі сліди наземних мін і боєприпасів, що не вибухнули, заходи з відновлення були зосереджені на розмінуванні, а також на застосуванні підходів до управління земельними ресурсами та розвитку засобів до існування, орієнтованих на місцеві об'єднання. Організації, такі як HALO Trust і Консультативна група з питань розмінування (MAG), зіграли ключову роль у знешкодженні наземних мін і вибухонебезпечних предметів, що сприяло поверненню переміщеного населення і відновленню засобів до існування, які базуються на сільському господарстві і природних ресурсах.

На території Близького Сходу, де затяжні конфлікти призвели до руйнування екосистем і переміщення мільйонів людей, заходи з відновлення зазнають подвійних викликів: екологічної деградації та політичної нестабільності. Такі ініціативи, як кампанії з лісовідновлення, проєкти з управління водними ресурсами та програми сталого сільського господарства, спрямовані на відновлення екологічної стійкості деградованих територій, водночас сприяючи активізації населення та розширенню його прав і можливостей. Незважаючи на складні процеси, притаманні політичній ситуації в регіоні, місцеві та міжнародні суб'єкти продовжують працювати над відновленням таких важливих екосистем, як Месопотамські болота в Іраку та басейн річки Йордан.

В Африці, де конфлікти виникають через конкуренцію за природні ресурси, відновлювальні роботи часто переплітаються з більш масштабними програмами з розбудови миру та розвитку. Такі ініціативи, як проєкт Африканського Союзу

«Велика зелена стіна», спрямовані на боротьбу з опустелюванням і деградацією земель шляхом висаджування дерев, відновлення деградованих земель і просування практики сталого управління земельними ресурсами в Сахельському регіоні. Вирішення екологічних проблем у поєднанні із заходами з врегулювання конфліктів та подолання бідності сприяють зміцненню стійкості та стабільності на територіях, що постраждали від конфлікту.

У Південно-Східній Азії, де причиною конфліктів є етнічна напруженість і боротьба за ресурси, діяльність з відновлення зосереджена на узгодженні конкуруючих інтересів і просуванні практики сталого землекористування. Програми розвитку лісового господарства на рівні громад у таких країнах, як Камбоджа та М'янма, розширюють можливості місцевих громад щодо спільного управління лісовими ресурсами, тим самим зменшуючи вирубку лісів і сприяючи збереженню біорізноманіття. Так само такі ініціативи, як проєкти з агроекології та сталого управління рибальством, спрямовані на усунення першопричин конфліктів, одночасно підвищуючи екологічну стійкість і безпеку джерел засобів до існування, а також практику їх правового врегулювання.

Збройний конфлікт в Україні спричинив значний вплив на стан земель, змінив природні ландшафти та умови життя в усьому регіоні. Аналіз поточного стану земель в умовах конфлікту виявляє складний взаємозв'язок між погіршенням стану довкілля, економічними проблемами та соціальними потрясіннями. Одним з найбільш безпосередніх наслідків конфлікту є руйнування інфраструктури та

Світовий досвід у відновленні ґрунтів після війни включає комплексний підхід: очищення від токсичних речовин (наприклад, важких металів, вибухових речовин), агротехнічні заходи (сівозмінна, глибока оранка, вапнування), використання органічних добрив (компост, гній), висаджування рослин-сидератів, та застосування біопрепаратів для оздоровлення ґрунту.

Заслужує на увагу міжнародний досвід післявоєнного використання та відновлення ландшафтів, у тому числі ґрунтів. У В'єтнамі кратери від американських бомбардувальників використовували як розплідники для риб. Також були створені своєрідні зони з природною сукцесією: покинута територія (відома як демілітаризована зона), що знаходиться між Північною та Південною Кореєю, наразі виконує важливу роль резервуару біорізноманіття, оскільки на ній мешкають тисячі видів.

Також для максимально постраждалих ділянок фахівці Української Природоохоронної Групи (UNCG) пропонують створення так званих «червоних зон» (за прикладом Франції), на яких після Першої світової існували «червоні зони», з яких населення було переселено.

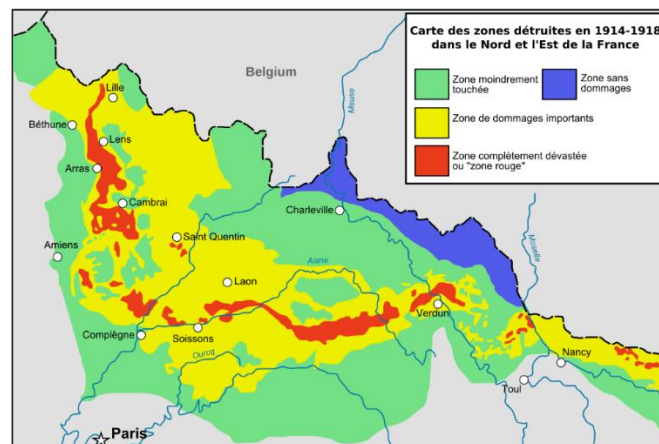


Рис. Мапа з зонами забруднення: ■ Зони, де проходила лінія фронту і які отримали найбільше забруднення ■ Зони, де бойові дії тривали короткий проміжок часу ■ Зони з помірною забрудненістю, де розташовувався тил армій, склади зброї та техніки ■ Зони, що не зазнали руйнувань



Рис. Покинута німецька траншея у Франції під час битви на Соммі



Рис. На полі битви під Верденом досі видно воронки від ударів артилерійських снарядів приблизно через 85 років після закінчення Першої світової війни

Площа родючої землі у понад 1200 км у районі Верденської битви (1916 рік) здобула визнання французької влади як «повністю розгромлена»: введення суворої заборони на доступ і ведення будь-яких сільськогосподарських робіт. З часом через очищення площа критично враженої зони була знижена до 100 км. Впродовж багатьох років територія має здатність 170 відновлюватися без антропогенного впливу, а вирви від вибухів стають частиною ландшафту [3]. Впровадження подібної практики одночасно забезпечує виконання вимог діючого законодавства України, що направлено на запобігання опустелюванню та консервацію земель. Також Європейська стратегія, що передбачає захист біорізноманіття до 2030 року, визначає необхідність виведення з обробітку 30 % усіх сільськогосподарських земель ЄС [4], що дозволяє включити українські угіддя до цієї вкрай вагової ініціативи. Доцільно відзначити, що Україна вже має найбільший в Європі досвід щодо виведення з обробітку забруднених земель – Зона відчуження Чорнобильської АЕС, яка ще 30 років тому використовувалася для активного сільськогосподарського виробництва наразі стала найбільшою зеленою «плямою» в самому центрі Європи й одержала статус біосферного заповідника [5]. Заслуговує уваги досвід, за якого постраждалий рельєф поля перетворюється у новий ландшафт, що включає природні оазиси, корисні для сільського господарства – більше стійкого і продуктивного в найближчому майбутньому. Для цього в Німеччині навмисне висаджують посеред полів малі лісові насадження та живі огорожі, створюють болітця. Подібні заходи забезпечують стабілізацію мікроклімату окремих полів, адаптацію до коливань клімату та розвитку естетичної привабливості територій (рис. 1).

Заслуговує уваги досвід, за якого постраждалий рельєф поля перетворюється у новий ландшафт, що включає природні оазиси, корисні для сільського господарства – більше стійкого і продуктивного в найближчому майбутньому. Для цього в Німеччині навмисне висаджують посеред полів малі лісові насадження та

живі огорожі, створюють болітця. Подібні заходи забезпечують стабілізацію мікроклімату окремих полів, адаптацію до коливань клімату та розвитку естетичної привабливості територій (рис. 1). Рисунок 1. Приклади природних оазисів Джерело: фото [6]. Відповідний досвід може бути використаний в умовах України шляхом створення природних осередків у вирвах внаслідок військових дій, що символічно відображує загоєння ран війни, забезпечує посилення стійкого сучасного агровиробництва. Пропонується перетворити вирви на ставки-копанки й «острови» лісів (рис. 2). Невеликі штучно створені лісові колки, чагарники та «копанки», особливо у поєднанні з лісосмугами, через декілька років будуть джерелом численних екосистемних послуг для агровиробників [6]: 1. Запобігання ерозії ґрунту шляхом зменшення швидкості вітру (разом з лісосмугами щонайменше на 25 %) [7]. 2. Стабілізація мікрокліматичних показників поля за підвищення вологості повітря на 5-20 %, ґрунту – на 15-30 %, скорочення випаровування – на 20-25 %. 171 3. Зменшення кількості шкідників поля відбувається через надання місця гніздівлі безлічі комахоїдних птахів, як протидія шкідникам. 4. Сприяння родючості здійснюється завдяки збільшенню пористості ґрунту до 9 % і вмісту гумусу – на 20-40 %, як результат активізації обмінних процесів в аграрних ландшафтах через уведення деревних та інших природних елементів. 5. Депонування вуглецю виникає в деревних рослинах і накопичення органічного вуглецю у ґрунті. 6. Зменшення рівня хімічного забруднення виникає завдяки тому, що деревні насадження вбирають і зв'язують хімічні елементи з різних шарів ґрунту, допомагають очищенню ґрунтових вод. Такі природні оазиси позитивно впливають на стан загального «здоров'я» сільськогосподарських угідь, активізуючи процеси кругообігу поживних речовин, що одночасно з механічною вітроломною дією та захистом ґрунтів, забезпечує збільшення врожаю на 20–30 %. Також бомбовий кратер може з часом використовуватися як пташиний двір, а оголений пагорб може відносно швидко замаскуватися зеленим шаром, можливо навіть достатнім для того,

щоб на ньому випасати худобу чи вирощувати сільськогосподарську продукцію. Однак, ця природна рослинність вже не відповідає справжній продуктивності ґрунту як раніше, а була втрачена через знищення ґрунтового профілю під час вибуху бомби або завдяки потенційному забрудненню ґрунту через розсіювання шкідливих залишків бомби. В результаті, навколишнє середовище та майбутні покоління позбавлені законної спадщини, коли реальність заподіяної шкоди полягає в знищенні родючості ґрунтів, формування яких тривало тисячоліттями, і для відновлення яких знадобиться стільки ж часу. Рисунок 2. Етапи створення природних оазисів на місці вирв від військових дій Джерело: побудовано за [6] У підсумку зазначимо, що наслідки воєнних дій для навколишнього середовища часто недооцінюються, оскільки втрати людей та інфраструктури, звичайно, переважають усе інше в короткостроковій перспективі. Війна також

1. Обстеження вирв і суміжних територій на наявність нездетонованих снарядів, прибирання металобрухту
2. Створення «острову» лісу
2. Підбір дерев і кущів місцевих видів (терен, глід, шипшина, ліщина, клен, дуб, дика груша, ясен тощо)
2. Дно воронки застеляють природним матеріалом для утримання води, наприклад глиною
3. На окраїнах висаджують верболози та очерет
3. Висадка дерев і кущів за схемою: високорослі види висаджують ближче до центру, а кущі та трави – ближче до краю

172 перешкоджає спробам покращити існуючу складну екологічну ситуацію. Так, порушуються діяльність та інвестиції, спрямовані на відновлення середовищ існування, збереження видів, покращення управління природоохоронними територіями, а також пом'якшення наслідків зміни клімату й адаптацію до них.

Вплив воєнних дій на стан ґрунтів в Україні

Збройна військова агресія росії на території нашої держави чинить негативний вплив не лише на теперішні умови проживання людей, забираючи життя, руйнуючи житлові будинки та інфраструктуру, але і унеможливорює використання багатьох природних ресурсів нашої країни в майбутньому, спричиняючи, як би загрозливо це не звучало, - пролонгований вплив війни на якість ґрунтів, води та повітря.

Вплив активних бойових дій, пов'язаних із широкомасштабним збройним вторгненням росії на територію України, на деградацію ґрунтів внаслідок військових дій призвів до пошкодження ґрунтів важкою військовою бронетехнікою. Уламки знищеної військової техніки, боєприпасів і залишків пального завдають багатофакторної шкоди ґрунтовій системі, викликаючи локальне та глобальне забруднення та втрати ґрунтових ресурсів (рис. 1).

У більшості досліджених випадків спостерігається механічна, хімічна та фізична деградація ґрунту. Це проявляється у змінах гранулометричних фракцій на місцях вибухів, горіння та місцях забруднення важкими металами. Спалювання обладнання, зокрема призводить до збільшення фракції піску (2,0–0,05 мм) у 1,2–1,8 раза та зменшення фракції глини ($<0,002$ мм) у 1,1–1,2 раза. Рівні забруднення ґрунту важкими металами значно зростають та перевищують санітарні норми, при цьому найвищі рівні забруднення спостерігаються для Pb, Zn і Cd .

На всіх ділянках ураження відбуваються зміни в структурі мікробіому (збільшення частки міцеліальних організмів у 20,5 раза), пригнічення активності мікробіологічних процесів (зменшення в 1,2 раза), зменшення мікробної біомаси (зменшення в 2,1 раза), спостерігається висока токсичність ґрунту (99,8%). Вибухи та піроліз бронетехніки мають значний вплив на мезобіоту ґрунту та рослини.

Результати досліджень вказують на існування складних взаємодій між різними факторами в ґрунтовому середовищі після вибуху, що значно впливає на стан ґрунту.

Встановлено, що найбільше зараження викликають танки з дизельними двигунами, такими як Т72Б3 і термобарична ракетна установка ТОС-1 «Солнцепек». Відносно менший вплив на ґрунт має танк Т-80 з газотурбінним двигуном. З огляду на те, що території ураження бронетехніки, як правило, розташовані на сільськогосподарських угіддях, виникає необхідність їх обов'язкового моніторингу та наукового супроводу для подальшої рекультивації.

Результати досліджень Solokha et al. (2024) показують значне збільшення кількості мікроміцетів, педотрофів та оліготрофів, що вказує на забруднення різними органічними та неорганічними токсичними сполуками. Ці стресові умови призвели до активної адаптації мікроорганізмів та залучення їх до перетворення органічних залишків.

Отримані результати свідчать про наявність складних взаємодій між різними факторами ґрунтового середовища після вибуху, які можуть викликати непередбачувані зміни в структурі та функції мікробних угруповань і мезофауни

Таким чином, отримані результати свідчать про наявність складних взаємодій між різними факторами ґрунтового середовища після вибуху, які можуть викликати непередбачувані зміни в структурі та функції мікробних угруповань і мезофауни. Подальші дослідження цих процесів мають вирішальне значення для глибшого розуміння їхнього впливу та потенційних наслідків для навколишнього середовища.

Фахівці інституту охорони ґрунтів України провели аналіз впливу військових дій на якість ґрунтів у Київській, Житомирській, Сумській та Харківській областях.

Проби ґрунту було досліджено на вміст важких металів, нафтопродуктів та агрохімічні показники. За результатами аналізу було встановлено перевищення гранично допустимих концентрацій Pb, Zn, Cu та Mn у Сумській області, що було наслідком активних бойових дій. У Харкові на різних вибухонебезпечних об'єктах концентрація нікелю (Ni) перевищувала гранично допустиму концентрацію. Крім того, дослідження підтоплення ґрунтів після руйнування дамби Каховського водосховища виявили забруднення Pb, Cd, Zn та Ni у Херсонській та Запорізькій областях.

Дослідниками Solokha et al. (2024) було встановлено зміни в ґрунті у місцях детонації та падіння уламків військової техніки (табл. 2), які включали збільшення вмісту вуглецю внаслідок горіння, а також зміни вмісту гумусу, оксидів фосфору та калію, а також сірки.

Попередні оцінки експертів свідчать про значні економічні втрати на загальну суму 34,442 мільярда доларів США, через пошкодження земельних ресурсів і ґрунтів через забруднення та контамінацію.

Оцінка впливу військових дій на якість ґрунтів в Україні підкреслює нагальну потребу у відновлювальних зусиллях і проактивних заходах для пом'якшення подальшої деградації довкілля. Висновки підкреслюють широке забруднення важкими металами та забруднювачами, що створює ризик як для продуктивності сільського господарства, так і для здоров'я населення.

Вирішення цих проблем вимагає скоординованих зусиль урядових установ, екологічних організацій та міжнародної спільноти для відновлення загального стану ґрунту та захисту добробуту постраждалих громад.

Необхідною є зміна агротехнологій:

Сівозміна. Значну увагу потрібно приділити вибору культур для вирощування, оскільки на забруднених ґрунтах особливу агрономічну цінність мають культури, які можуть нормально рости, розвиватись та формувати врожай за високого вмісту важких металів та радіоактивних елементів, але вміст цих забруднюючих речовин у продукції рослинництва не перевищує гранично допустимі концентрації. До таких культур належить кукурудза. За результатами досліджень, що проводились у виробничому досліді у ТОВ «Кароля» Житомирської області, Бердичівського району впродовж 2020–2022 рр. було встановлено, що концентрація, таких важких металів (мг/кг зерна), як Pb та Cd не перевищувала допустимі значення ГДК. Незначні перевищення вмісту важких металів Cu та Zn спостерігалось у гібриду ДН Славиця за дещо вищих норм добрив. Це доводить, що вирощування кукурудзи, без застосування добрив дозволить досягти виносу важких металів рослинами, без надлишкового забруднення зерна ними. Натомість соняшник є культурою, яка має генетичну властивість накопичувати цезій та кадмій, тому не може бути рекомендованою для введення в сівозміни за таких умов.

Фіторемедіація. Культури, які формують значну вегетативну масу та характеризуються підвищеними виносами забруднюючих речовин, доцільно вводити у сівозміни на ділянках, які мають підвищені рівні забруднення важкими металами та радіонуклідами. Придатними для фіторемедіації може бути енергетична культура міскантус гігантський, також коноплі характеризуються високим виносом свинцю, кадмію, міді, цинку. Горох посівний також виносить значну кількість важких металів та радіоактивних елементів із ґрунту, при цьому має найнижчий коефіцієнт формування вегетативної маси, порівняно із попередніми культурами. Але відкритим, за таких умов, залишається питання утилізації такої вегетативної маси рослин.

Внесення мікробіологічних препаратів. У місцях горіння техніки, влучань ракет та бомб відбувається стерилізація ґрунту, більшість корисних мікроорганізмів гине. А отже застосування мікробних препаратів сприятиме відновленню мікробіоти ґрунту.

Хімічна меліорація. Застосування вапнякових матеріалів ще після аварії на ЧАЕС сприяло зниженню вмісту радіоактивних елементів у ґрунті та важких металів. Високу детоксикаційну ефективність проявляють цеоліти, при застосуванні яких на кислих ґрунтах із високим вмістом свинцю, вдавалось знизити його концентрацію на 20-30%. Базальтові туфи можна ефективно використовувати в якості сорбентів для поглинання радіоактивних елементів та важких металів.

Система удобрення. Безумовно, найкращими добривами для забруднених та контамінованих ґрунтів після воєнних дій, є органічні. Також застосування підвищених норм фосфорних добрив сприятиме зв'язуванню свинцю та цинку у фосфатну форму, яка є важкорозчинною і малодоступною для рослин. Навіть допускається застосування фосфоритного борошна, до складу якого входить аніон ортофосфорної кислоти PO_4^{3-} , який є малодоступний для переважної більшості рослин, але здатен утворити нерозчинні сполуки важких металів. Цезій-137 є хімічним аналогом калію, тому застосування підвищених доз калійних добрив за умови збалансованого азотного і фосфорного живлення сприяє меншому накопиченню цезію-137 в рослинах.

Техногенне ґрунтознавство. Сучасний напрямок у ґрунтознавстві, який включає комплекс гірничотехнічних, інженерно-будівельних, меліоративних, сільськогосподарських заходів. Здійснення комплексу заходів для забезпечення можливості повторного використання земель, пошкоджених у процесі військової діяльності. Перший технічний етап рекультивації включає відновлення рельєфу (засипка вирв, траншей, окопів і ін.). Другий біологічний етап – повернення туди

попередньо знятого ґрунтового шару, лісовідродження (виращування лісів на вирубках, згарищах, відвалах), відновлення родючості, включаючи комплекс агротехнічних заходів.

Заклучення

Меліорація ґрунтів постає сьогодні не лише як сукупність інженерно-технічних заходів, а як стратегічний інструмент сталого управління земельними ресурсами. Вона поєднує наукове розуміння природних процесів із технологічними рішеннями, спрямованими на підтримання екологічної рівноваги, забезпечення продовольчої безпеки та відновлення деградованих екосистем.

У сучасних умовах кліматичних змін і зростання антропогенного навантаження меліорація набуває нових змістів. Її завданням стає не лише підвищення продуктивності ґрунтів, а й формування стійких агроландшафтів, здатних зберігати природний потенціал і підтримувати біорізноманіття. Важливу роль у цьому відіграють інноваційні підходи — цифрові технології, автоматизовані системи моніторингу, інтернет речей і штучний інтелект, що відкривають нові можливості для точного та раціонального управління водними й ґрунтовими ресурсами.

Меліорація стає простором синтезу природничих, технічних та соціальних знань, де ключовим принципом є баланс між господарською діяльністю та збереженням довкілля. Саме в цьому контексті вона розглядається як наука і практика, що сприяє переходу до моделей сталого розвитку, здатних забезпечити гармонію між людиною, ґрунтом і водою.

Джерела інформації

1. Ромащенко М. І., Рокочинський А. М., Корюненко В. М. Краплинне зрошення : навч. посіб. Стереотипне вид. Херсон : ОЛДІ+, 2024. 300 с.
2. Шатковський А. П., Журавльов О. В. Наукові основи технологій краплинного зрошення сільськогосподарських культур : монографія. Одеса : Гельветика, 2021. 439 с.
3. Лозовіцький П. С. Водні та хімічні меліорації ґрунтів : навч. посіб. Київ : Київський університет, 2010. 275 с.
4. Чайка Т. О., Короткова І. В. Відновлення родючості ґрунту в Україні після воєнних дій. Захист і відновлення екологічної рівноваги та забезпечення самовідновлення екосистем : колект. монографія / за заг. ред. Т. О. Чайки. Полтава : Астроя, 2023. С. 232–281.
5. Смирнова С. М. Меліоративне ґрунтознавство : метод. вказівки для студентів спеціальності 193 «Геодезія та землеустрій». Миколаїв : ЧНУ ім. Петра Могили, 2020. 116 с.
6. Лівак А. П. Порівняльний аналіз міжнародних методик відновлення земель після збройних конфліктів та їх застосування в Україні. Академічні візії. 2024. № 31.
7. Anwar T., Munwwar F., Qureshi H., et al. Synergistic effect of biochar-based compounds from vegetable wastes and gibberellic acid on wheat growth under salinity stress. Scientific Reports. 2023. Vol. 13. Article 19024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46487-0>.

8. Li X., Zhang Y., Liu D., Zheng X., Khalid M., Lv W., Song K. Synergistic evolution of soil and vegetation in reclamation areas with different developmental years on Hengsha Island. *Agriculture*. 2025. Vol. 15, No. 21. Article 2196. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15212196>.
9. Skok S., Breus D., Almashova V. Assessment of the effect of biological growth-regulating preparations on the yield of agricultural crops under the conditions of Steppe zone. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. Vol. 24, No. 7. P. 135–144. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/163494>.
10. Almashova V., Breus D., Olifirenko V. Influence of the studied factors on the yield, structure and quality indicators of vegetable peas under the conditions the South of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. Vol. 25, No. 6. P. 312–321. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/187959>
11. Tessema N., Yadeta D., Kebede A., Ayele G. T. Soil and irrigation water salinity, and its consequences for agriculture in Ethiopia: a systematic review. *Agriculture*. 2023. Vol. 13, No. 1. Article 109. DOI: 10.3390/agriculture13010109.
12. Furtak K., Wolińska A. The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture – a review. *Catena*. 2023. Vol. 231. Article 107378. DOI: 10.1016/j.catena.2023.107378.
13. Bonchkovskyi O., Ostapenko P., Bonchkovskyi A., Shvaiko V. War-induced soil disturbances in north-eastern Ukraine (Kharkiv region): physical disturbances, soil contamination and land use change. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 964. Article 178594. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.178594.
14. Soil degradation and contamination due to armed conflict in Ukraine. *Land*. 2024. Vol. 13, No. 10. Article 1614. DOI: 10.3390/land13101614.

15. The environment as the first victim: The impacts of the war on the preservation areas in Ukraine. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 364. Article 121399. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121399.
16. Assessment of soil cover chemical pollution using satellite data: A case study of Kharkiv region, Ukraine. *Science of the Total Environment*. 2025. Vol. 995. Article 180105. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2025.180105.
17. FAO. Irrigation management under saline conditions. 2022. FAO Land and Water Division. URL: <https://www.fao.org/in-action/building-forward-better/learning-resources/water-productivity/self-administered-course/irrigation-management-under-saline-conditions/en> (дата звернення: 29.04.2025).
18. FAO. Measures for coping with soil salinity. FAO eLearning Academy. URL: <https://elearning.fao.org/course/view.php?id=1093> (дата звернення: 29.04.2025).